

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

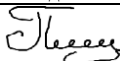
Школа	Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки	14.04.02 Ядерные физика и технологии
Отделение школы (НОЦ)	Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного плутоний-уранового ядерного топлива

УДК 621.039.543:661.8'02:66.011:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Пшеничников А.С.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ	А.Г. Каренгин	к.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОЯТЦ	И.Ю. Новоселов	—		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	И.В. Кащук	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОЯТЦ	Т.С. Гоголева	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ	Л.И. Дорофеева	к.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Профессиональные компетенции	
P1	Способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности, расширять и углублять свое научное мировоззрение.
P2	Готовность к созданию новых методов расчета современных физических установок и устройств, разработке методов регистрации ионизирующих излучений, методов оценки количественных характеристик ядерных материалов.
P3	Способность применять экспериментальные, теоретические и компьютерные методы исследований в профессиональной области.
P4	Способность самостоятельно выполнять экспериментальные или теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современной техники и методов расчета и исследования
P5	Способность оценивать риск и определять меры безопасности для новых установок и технологий, составлять и анализировать сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения.
P6	Способность провести расчет, концептуальную и проектную проработку современных физических установок и приборов
P7	Способность формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов.
P8	Способностью к анализу технических и расчетно-теоретических разработок, к учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности и другим нормативным актам.
P9	Способность на практике применять знание основных понятий в Области интеллектуальной собственности, прав авторов, предприятия-работодателя, патента обладателя, основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
P10	Способность проводить поиск по источникам патентной информации, определять патентную чистоту разрабатываемых объектов, подготавливать первичные материалы к патентованию изобретений, официальной регистрации компьютерных программ и баз данных

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Школа	Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность)	14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Отделение школы (НОЦ)	Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

_____ Л.И.Дорофеева
«___» _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
ОАМ81	Пшеничникову Александру Сергеевичу

Тема работы:

Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного плутоний-уранового ядерного топлива	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	02.03.2020 №62-51/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2020 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Исследовать влияние органического компонента на показатели горючести водно-органических нитратных растворов. Определить режимы плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного плутоний-уранового топлива. Исследовать их физико-химические и технологические свойства.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Обзор и анализ физических методов получения наноразмерных порошков 2. Определение оптимальных составов водно-органических нитратных растворов 3. Термодинамическое моделирование равновесных составов продуктов плазмохимического синтеза 4. Подготовка экспериментального плазменного стенда 5. Подготовка модельных прекурсоров и проведение экспериментов с получением опытных образцов порошка 6. Исследование и анализ свойств полученного порошка, синтезированного в плазме ВЧФ-разряда 7. Экономическое обоснование проведения НИР 8. Выводы по работе. Заключение

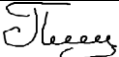
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	И.В. Кашук
Социальная ответственность	Т.С. Гоголева

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.03.2020 г.
--	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	А.Г. Каренгин	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	А.С. Пшеничников		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Пшеничникову Александру Сергеевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02«Ядерные физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

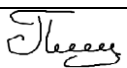
1. Сегментирование рынка
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НТИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
6. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Ирина Владимировна Кашук	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Пшеничников Александр Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM81	Пшеничников Александр Сергеевич

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»

Тема ВКР:

Моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для дисперсионного плутоний-уранового ядерного топлива

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Термодинамическое моделирование в программном обеспечении TERRA процесса плазменной переработки водно-органических нитратных растворов (ВОНР), обеспечивающее прямой синтез топливных композиций для уран-плутониевого топлива.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – Отклонение показателей микроклимата; – Превышение уровня шума; – Повышенный уровень электромагнитного излучения; – Недостаточная освещенность рабочей зоны; – Поражение электрическим током; – Возгорание.
3. Экологическая безопасность:	– анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду; – разработка организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС при эксплуатации

	проектируемого решения: – возгорание; – поражение электрическим током; – воздействие вредных веществ. Наиболее типичное ЧС: – Возгорание.
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Пшеничников Александр Сергеевич		

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	12
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	13
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	14
ВВЕДЕНИЕ.....	15
1 Обзор литературы	16
1.1 Матрица ядерного топлива	16
1.1.1 Материалы матрицы на основе металлов	17
1.1.2 Алюминий и его сплавы	18
1.1.3 Цирконий.....	19
1.1.4 Магний.....	20
1.1.5 Материалы матрицы на основе оксидов	21
1.1.6 Материалы матрицы на основе нитридов.....	23
1.1.7 Материалы матрицы на основе карбидов.....	25
1.2 Оксид плутония и смешанное уран-плутониевое оксидное топливо	26
1.2.1 Получение смешанного оксидного топлива.....	28
1.2.2 Изготовление таблеток	28
1.2.3 Поведение PuO_2 и $PuO_2 - UO_2$ под облучением.....	32
1.2.4 Применение PuO_2 и $(U,Pu) O_2$ в ядерных реакторах.....	34
2 Расчетная часть.....	36
2.1 Расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов и определение оптимальных составов.	36
2.2 Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР.....	39

3 Экспериментальная часть.....	42
3.1 Лабораторный стенд для проведения исследований.....	42
3.2 Определение расхода плазмообразующего газа через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона	43
3.2 Расчет расхода газа через реактор.....	46
3.3 Расчет основных технологических параметров установки	47
3.4 Плазмохимическая переработка модельных растворов.....	48
3.5 Анализ полученных результатов	49
3.6 Выводы	57
3.7 Заключение	58
4 Социальная ответственность	59
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	59
4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	59
4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	61
4.2 Производственная безопасность.....	62
4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	62
4.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	62
4.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата.....	64
4.2.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны	65
4.2.2.3 Повышенный уровень шума	65
4.2.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения	66
4.2.2.5 Поражение электрическим током.....	66

4.2.2.6 Пожаробезопасность на рабочем месте	67
4.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	68
4.2.3.1 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ.....	68
4.2.3.2 Микроклимат	68
4.2.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	69
4.2.3.4 Повышенный уровень шума	69
4.2.3.5 Электромагнитные излучения (ЭМИ).....	69
4.2.3.6 Поражение электрическим током.....	70
4.2.3.7 Пожаробезопасность на рабочем месте	71
4.3 Экологическая безопасность.....	71
4.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду	71
4.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	71
4.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	72
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	73
4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	73
4.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	73
4.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	74
5 Финансовый Менеджмент, Ресурсоэффективность и Ресурсосбережение .	76
5.1 Потенциальные потребители результатов исследования	76
5.2 Анализ конкурентных технических решений	77
5.3 SWOT-анализ.....	78

5.4 Планирование научно-исследовательских работ.....	80
5.4.1 Структура работ в рамках научного исследования	80
5.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ	80
5.4.3 Разработка графика проведения научного исследования	81
5.4.4 Бюджет научно-технического исследования	83
5.4.5 Расчет материальных затрат НТИ	84
5.4.6 Амортизация оборудования	84
5.4.7 Основная заработная плата исполнителей темы.....	85
5.4.8 Дополнительная заработная плата	86
5.4.9 Отчисления во внебюджетные фонды	87
5.5 Накладные расходы.....	87
5.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	88
5.7 Определение ресурсоэффективности исследования	89
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А	95
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ В	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	111

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 112 страниц, 28 рисунков, 22 таблицы, 30 источников, 5 приложений.

Ключевые слова: высокочастотный факельный разряд, плазма, высокочастотный факельный плазмотрон, водно-органический нитратный раствор, плазмохимический синтез, оксидные композиции.

Объектом исследования является процесс плазмохимического синтеза оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов.

Цель работы – моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций «диоксид плутония–диоксид урана–диоксид магния» в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов.

В диссертации рассматривается место дисперсионного ядерного топлива в ядерной энергетике. Анализируются свойства компонентов дисперсионных композиций и их влияние на свойства дисперсионного топлива.

Диссертация состоит из 5 глав. В первой главе дан обзор методов получения дисперсионного ядерного топлива и его использования в реакторах различного назначения. Во второй главе произведен расчет и оптимизация процесса прямого синтеза в воздушной плазме топливных оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{--PuO}_2\text{--MgO}$ » для дисперсионного уран-плутониевого ядерного топлива из водно-органических нитратных растворов, включающих водные нитратные растворы делящихся металлов (уран, плутоний) и металл матрицы (магний), а также органический компонент (ацетон, этанол). В 3 главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса прямого синтеза в воздушной плазме оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов неодима, самария и магния, имитирующие процесс плазмохимического синтеза оксидных композиций « $\text{UO}_2\text{--PuO}_2\text{--MgO}$ ».

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Плазма – частично или полностью ионизированный газ, образованный из нейтральных атомов (или молекул) и заряженных частиц (ионов и электронов).

ВЧФ-плазмотрон – устройство для генерирования потоков воздушной неравновесной плазмы.

Температура вспышки – наименьшая температура летучего конденсированного вещества, при которой пары над поверхностью вещества способны вспыхивать в воздухе под воздействием источника зажигания, однако, устойчивое горение после удаления источника зажигания не возникает.

Температура воспламенения – наименьшая температура вещества, при которой пары над поверхностью горючего вещества выделяются с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение.

Температура самовоспламенения – наименьшая температура горючего вещества, при нагреве до которой происходит резкое увеличение скорости реакций, приводящее к возникновению пламенного горения или взрыва.

Адиабатическая температура горения – это температура полного сгорания смесей любого состава при отсутствии тепловых потерь в окружающую среду.

Низшая теплотворная способность – количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой (для твердых и жидких веществ) или объёмной (для газообразных) единицы вещества.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДЯТ – дисперсионное ядерное топливо

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

T_{всп} – температура вспышки

T_{восп} – температура воспламенения

T_{самовосп} – температура самовоспламенения

Q_н^c – низшая теплотворная способность жидких органических веществ

Q_н^p – низшая теплотворная способность водно-солеорганических композиций

T_{ад} – адиабатическая температура горения

ВВЕДЕНИЕ

Основной частью тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) является ядерное топливо, которое может быть гомогенным в виде соединений делящегося изотопа или гетерогенным, в котором частицы вещества делящегося изотопа равномерно распределены в матрице из неделящегося материала.

Особой чертой дисперсионного ядерного топлива (ДЯТ) при работе в реакторе является его высокая радиационная стойкость, по сравнению с другими. В связи с этим ДЯТ нашло широкое применение в исследовательских и материаловедческих реакторах, а также в ядерных установках специального назначения, для которых характерны повышенные плотности делений, мощности энерговыделения и температуры. В последнее время возник еще один стимул для разработки и применения ДЯТ. Это связано с необходимостью снижения накопленных запасов оружейного и энергетического плутония.

Для этого разрабатывается IMF топливо (Inert Matrix Fuel), являющееся дисперсионной композицией, в которой плутоний равномерно распределен в безурановой матрице. IMF-топливо позволяет основательно снизить запасы плутония, значительно увеличить выгорание делящегося изотопа. Использование этого вида топлива обеспечивает прямое захоронение отработанного ядерного топлива.

В диссертации рассматривается место ДЯТ в ядерной энергетике. Анализируется получение нанопорошков для дальнейшего использования при производстве ДЯТ.

1 Обзор литературы

1.1 Матрица ядерного топлива

Одним из компонентов ДЯТ является неделяющийся материал (матрица), который обеспечивает высокую радиационную стойкость такого типа ядерного топлива.

Несмотря на то, что ДЯТ применяется в реакторах различного назначения (исследовательских, энергетических, ядерных энергетических установок и т.д.), условия работы которых значительно различаются, имеется ряд требований, которые необходимо учитывать при выборе материала матрицы. При выборе материала матрицы необходимо учитывать ядерные свойства, физико-механические и экономические. В первую очередь материал матрицы должен иметь наименьшее значение поперечного сечения поглощения тепловых нейтронов. Кроме того, он должен удовлетворять следующим требованиям: [1]

- иметь температуру плавления выше рабочей температуры топливного сердечника ТВЭЛов,
- обладать высокими механическими свойствами (прочностью, упругостью, твердостью и т.д.), причем крайне важны не только их кратковременные значения, но и длительная прочность, скорость ползучести и т.д., чтобы сдерживать давление выходящих из топлива газообразных продуктов деления,
- теплофизические свойства (теплопроводность, коэффициент термического расширения и т.д.) должны обеспечивать хорошую передачу тепловой энергии от топливной частицы через оболочку к теплоносителю,
- крайне важно, чтобы материал матрицы был совместим с топливной композицией, материалом оболочки и теплоносителем,
- материал матрицы не должен иметь фазовых превращений и быть устойчивым в условиях радиационного облучения.

Кроме свойств, обеспечивающих работоспособность ТВЭЛа,

использующего ДЯТ, необходимо при выборе материала матрицы учитывать его доступность и стоимость. В качестве материала матрицы при производстве ТВЭЛов дисперсионного типа исследовательских реакторов и реакторов корабельных ЯЭУ широкое применение нашли алюминий и цирконий, а также их сплавы. Матрица из нержавеющей стали используется в ДЯТ в энергетических реакторных установках. Графит служит матричным материалом при изготовлении ТВЭЛов реакторов HTGR. При разработке топлива типа IMF, предназначенного для «сжигания» плутония, чаще всего в качестве материалов матрицы, используются керамические материалы в основном оксидного типа.

1.1.1 Материалы матрицы на основе металлов

При выборе материала матрицы ДЯТ основное требование заключается в том, чтобы материал матрицы имел минимальное значение поперечного сечения поглощения тепловых нейтронов. В таблице 1 приведены данные о поперечном сечении поглощения тепловых нейтронов некоторых элементов.

Поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов сплавов определяется как сумма произведений ядерной концентрации на сечение поглощения для каждого компонента сплава, деленная на общее число ядер в грамме сплава. Определенное таким образом поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов нержавеющей стали ЭМ-847 (ОХ16Н15МЗБ) составляет $3,05 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ [2].

**Таблица 1. Поперечные сечения поглощения тепловых нейтронов
некоторых элементов**

Элемент	Поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов, 10^{-24} см ²	Элемент	Поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов, 10^{-24} см ²
Бериллий	$10 \cdot 10^{-2}$	Титан	5,8
Углерод	$3,7 \cdot 10^{-3}$	Ванадий	5,0
Азот	1,9	Марганец	13,2
Кислород	$2,0 \cdot 10^{-2}$	Железо	2,6
Магний	$7,0 \cdot 10^{-2}$	Никель	4,6
Алюминий	0,24	Медь	3,8
Кремний	0,16	Молибден	2,7
Цирконий	0,18	Вольфрам	19,2
Ниобий	1,16	Титан	21,0
Хром	3,1		

1.1.2 Алюминий и его сплавы

Алюминий и его сплавы широко используются в качестве матрицы дисперсионной топливной композиции для ТВЭЛов исследовательских реакторов из-за хороших ядерных и теплофизических свойств, а также прекрасных технологических качеств. Однако алюминий имеет низкую прочность и неудовлетворительную коррозионную стойкость. При рабочих температурах большинства исследовательских реакторов (100–150°С) эти недостатки незначительно влияют на работоспособность ТВЭЛов ИР.

Для повышения механических свойств алюминия его легируют магнием, цинком, кремнием, медью, серебром, литием и галлием. Наибольший эффект повышения механических свойств алюминия достигается при одновременном легировании несколькими элементами. Сплавы алюминия после термообработки с дисперсионным твердением обладают хорошими длительными механическими свойствами. В таблице 2 приведены данные о механических свойствах алюминия.

Таблица 2. Механические свойства некоторых сплавов алюминия до и после облучения потоком нейтронов

Марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	β , %
	До/После облучения	До/После облучения	До/После облучения
АД1	95/180	47/120	38/21
САВ-1	290/330	245/280	11/10
6061 (61S) США	315/350	270/310	17,5/16

Имеющиеся данные показывают, что технический алюминий, содержащий железо, кремний, медь и другие примеси, может успешно использоваться в качестве матрицы дисперсионной топливной композиции до температур 100 – 130°С. Технический алюминий с добавкой никеля используется в качестве матрицы топливной дисперсионной композиции в энергетических ядерных реакторах с водой под давлением при высокой температуре.

1.1.3 Цирконий

При большой плотности теплового потока необходим материал матрицы ДЯТ с более высокой, чем у алюминия, температурой плавления. Широкое применение цирконий как матричный материал нашел в реакторах корабельных ядерных энергетических установок.

Цирконий и его сплавы широко применяются в атомной энергетике благодаря совокупности своих свойств: ядерных, химических и технологических. Однако эти свойства проявляются, если цирконий очищен от гафния, с которым он обычно находится в природе. Перед применением в атомной технике цирконий обычно подвергается йодному рафинированию.

В настоящее время установлено существование трех фаз циркония: α -фаза ($T > 862^\circ\text{C}$), β ($T = 862\text{--}1855^\circ\text{C}$) и нестабильная ω -фаза ($P > 6$ ГПа). При фазовом превращении происходят объемные изменения, которые необходимо учитывать при определении эксплуатационных условий изделий из циркония.

На рисунке 1 показано влияние легирующих элементов на прочность циркония. Наиболее важными легирующими элементами, используемыми в сплавах циркония, являются ниобий и олово.

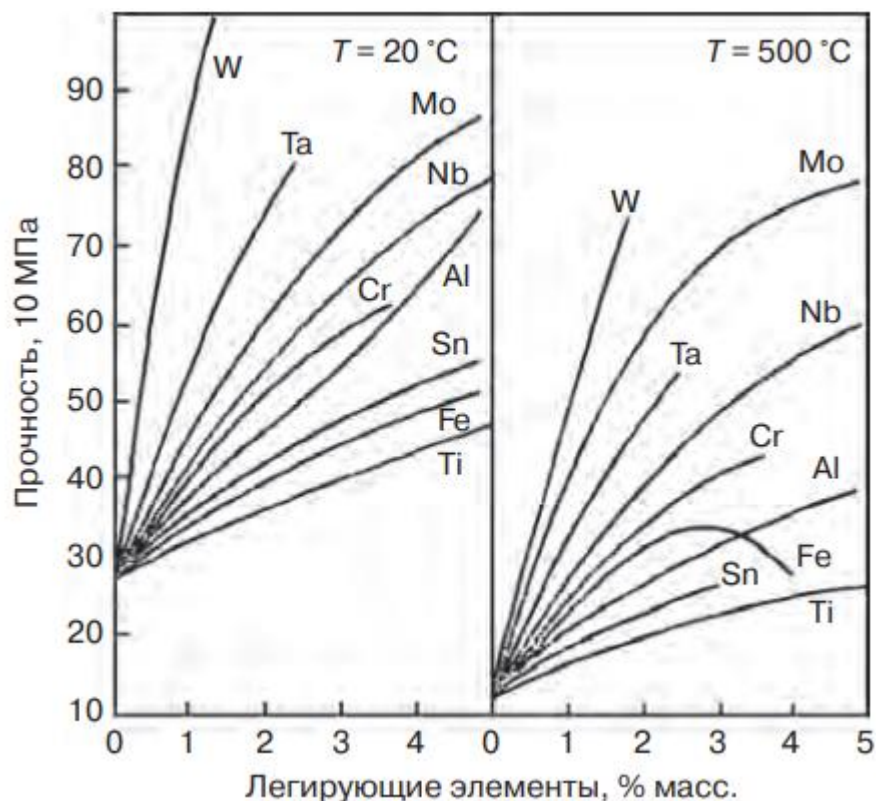


Рисунок 1. Влияние содержания легирующих элементов на прочность циркония при различных температурах

1.1.4 Магний

В СССР в первой в мире АЭС, а также Белоярской АЭС, Билибинской АТЭЦ, в реакторах ИРТ-2000 и ИРТ-5000 в качестве ДЯТ использовалась композиция, в которой в качестве матричного материала применялся магний[3]

. Природный магний состоит из смеси трех стабильных изотопов Mg^{24} (78,00%), Mg^{25} (10,11%) и Mg^{26} (11,29%). Магний имеет гексагональную кристаллическую решетку с параметрами (25 °C), нм: $a = 0,3202$, $c = 0,5199$, $c/a = 1,624$. Плотность магния зависит от содержания примесей и при 25 °C равна $1,738\text{ г/см}^3$ (99,9% Mg). На рисунке 2 показано влияние легирующих компонентов на изменение плотности магния.

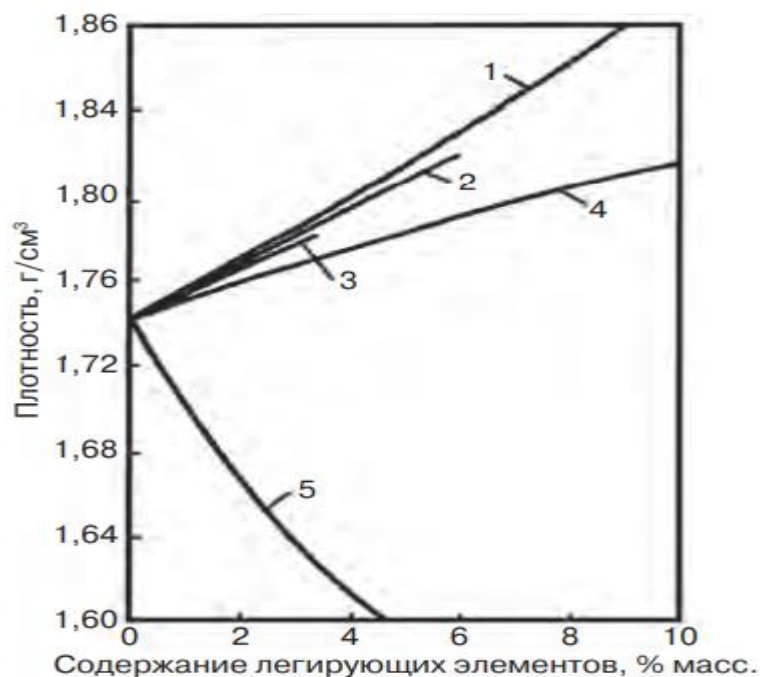


Рисунок 2. Влияние легирующих компонентов на плотность магния:

1 – Zn, 2 – Ce, 3 – Mn, 4 – Al, 5 – Li

Малое сечение захвата тепловых нейтронов магния (0,06 барн), практически отсутствие его взаимодействия с ураном, хорошая теплопроводность и прочность сплавов магния послужили основанием их применения в атомной энергетике. Сплавы магния в качестве конструкционных материалов применялись в Англии (сплав «магнокс»), во Франции. Следует отметить, что реакторное облучение магниевых сплавов не вызывает изменений в его структуре и свойствах.

1.1.5 Материалы матрицы на основе оксидов

Уже к концу 90-х годов основное внимание при выборе материала инертной матрицы топлива IMF было сосредоточено на оксидных системах. Это в основном обусловлено тем, что наиболее изученное и используемое ядерное топливо – оксидное (UO_2 , PuO_2).

Среди оксидов в качестве матричного материала в основном рассматривали ZrO_2 , MgO , Al_2O_3 , Y_2O_3 , CeO_2 и более сложные оксидные системы: $(\text{Zr}, \text{Ca})\text{O}_{2-x}$, $(\text{Zr}, \text{Y})\text{O}_{2+x}$, ZrSiO_4 , $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, MgAl_2O_4 и др.

Исходя из данных таблице 3 Al_2O_3 , MgO , MgAl_2O_4 , Ce_2O_3 , Y_2O_3 и

стабилизированный ZrO_2 могут быть использованы в качестве материала инертной матрицы IMF–топлива.

Таблица 3. Совместимость оксидных материалов

Вещество	Характер взаимодействия					
	Al_2O_3	MgO	Ce_2O_3	Y_2O_3	ZrO_2	$MgAl_2O_4$
Железо (оболочка ТВЭЛа)	Совместим при температуре ниже 900	Совместим при температуре ниже 1100	Совместим при температуре ниже 650	Совместим металлам при температуре ниже 1500	Совместим при температуре ниже 1200	Совместим
Вода	Не растворяется	Образуется гидрооксид	Не растворяется	Медленно растворяется		
HNO_3	Не растворяется	Растворим с низкой скоростью	Растворим с низкой скоростью	Растворим с низкой скоростью	Не растворяется	

Диоксид циркония привлек внимание разработчиков матричных материалов IMF своими хорошими физико-механическими свойствами при малом сечении захвата тепловых нейтронов цирконием. ZrO_2 отличается высокой химической и радиационной стойкостью. Однако ниже температуры плавления этот оксид имеет три типа кристаллической структуры:

- высокотемпературная кубическая фаза, изоморфная с флюоритом CaF_2 при температуре выше 2640 °C,
- промежуточная тетрагональная фаза в диапазоне от 1440 до 2640 К,
- низкотемпературная моноклинная фаза при Т ниже 1420 К.

Очень важное свойство ZrO_2 – стабилизация кубической флюоритной структуры от температуры плавления до комнатной при замене Zr^{+4} в ZrO_2 алювалентными катионами Mg^{+2} , Ca^{+2} , Y^{+3} . Недостатком диоксида циркония является низкая теплопроводность, которую можно повысить, добавляя $MgAl_2O_4$.

Для примера теплопроводности $MgAl_2O_4$, $ZrSiO_4$ и CeO_2 при 1000 К равны 5,39, 4,20 и, 3,02 Вт/(м·К) соответственно. Теплопроводность UO_2 при 1000 К равна 3,6 Вт/(м·К). Из приведенных данных (рисунок 3) следует, что теплопроводность CeO_2 довольно низкая. Теплопроводность топлива 25% об.

PuO_2 – 75% об. Al_2O_3 при температуре 1000 °С равна 6,6 Вт/(м·К). Теплопроводность топлива, содержащего 25% об. PuO_2 и 75% MgO при 1000°С равна 5,8 Вт/(м·К) и 5,7 Вт/(м·К) при 2000 °С.

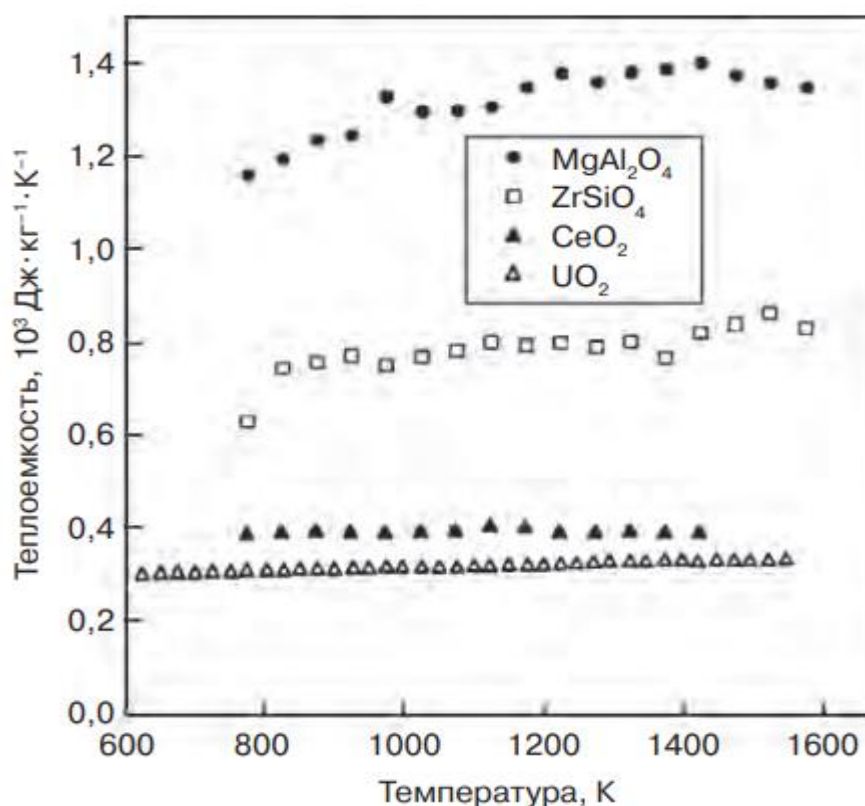


Рисунок 3. Влияние температуры на изменение теплоемкости

1.1.6 Материалы матрицы на основе нитридов

Наиболее благоприятное топливо реакторов на быстрых нейтронах – твердый раствор на основе UN-PuN . Переработка такого вида топлива в топливо IMF предпочтительна с использованием в качестве материала инертной матрицы нитридов. Некоторые свойства нитридов приведены в

Мононитриды плутония и урана являются в высокой степени взаимно растворимыми. В системе AlN-PuN взаимная растворимость не обнаружена. Стоит отметить, что не рекомендуется использовать в качестве материала инертной матрицы IMF нитрид титана из-за его ограниченной (~31% мол.) растворимости в PuN. Нитриды хрома (CrN) имеют высокое парциальное давление азота (≈ 1 мм рт. ст. при 1048°С), поэтому их нецелесообразно использовать в качестве матричного материала. Из-за ограниченной

термостабильности Mg_3N_2 не рассматривают как материал матрицы IMF. По совокупности свойств наиболее подходящими материалами инертного разбавителя IMF являются нитриды алюминия и циркония. В таблице 4 и 5 представлены основные свойства нитридов металлов.

Таблица 4. Основные физико-механические свойства нитридов металлов

Свойства	Нитриды					
	AlN	Si ₃ N ₄	Mg ₃ N ₂	CeN	YN	ZrN
Температура плавления, °C	Инконгруэнтное	Инконгруэнтное	Инконгруэнтное	2480	2670	2960
Давление азота, мм.рт.ст.	10 ⁻³ (2000°C)	5 · 10 ⁻³ (1500°C)	10 ⁻⁸ (1000°C)	4 · 10 ⁻⁸ (1500°C) 4 · 10 ⁻⁴ (2000°C)	≈ 10 ⁻⁷ (1500°C) ≈ 10 ⁻³ (2000°C)	≈ 10 ⁻¹² (1500°C) ≈ 10 ⁻⁷ (2000°C)
Температура разложения при давлении N ₂ 1 атм. °C	2417	1878	<1500 °C	–	–	–
Теплопроводность	62 (500°C) 36 (1000°C) 27 (1500°C)	12 (500°C) 9 (1000°C) 10 (1500°C) 12 (2000°C)		5 (800– 2000°C)	–	17 (500°C) 23 (1000°C) 26 (1500°C) 24 (2000°C)
Модуль нормальной упругости E, ГПа	370	320	–	–	300	328

Таблица 5. Совместимость нитридов металлов

Свойства	Нитриды					
	AlN	Si ₃ N ₄	Mg ₃ N ₂	CeN	YN	ZrN
Аустенитные стали	Совместим при T>1000 °C	Совместим при T<900 °C				Взаимодействует
Вода	Медленно гидролизуются	Не растворяется	При 100°C легко разлагается	Разлагается	При 100 °C разлагается	Не растворим при 100 °C
HNO ₃	Высокая скорость растворения при 110 °C K = 8 мг/см ² · ч	Не растворяется	Растворим	Растворим	Растворим	Скорость растворения при 110 °C K = 0,17 мг/см ² · ч
Воздух	До 700 °C не взаимодействует			Быстрое окисление при T _{комн}	Быстро взаимодействует при T _{комн}	Не взаимодействует при T _{комн}

1.1.7 Материалы матрицы на основе карбидов

Наибольшее число исследований, посвященных выбору материалов для инертных матриц IMF–топлива, касается оксидов, однако исследуется возможность использования и карбидных материалов[4]. В качестве таких материалов рассматриваются карбиды кремния и бора. В таблице 6 приведены свойства B_4C и SiC , характеризующие эти карбиды как материалы инертных матриц IMF–топлива.

Таблица 6 Свойства B_4C и SiC .

Свойства	B_4C	SiC
Область гомогенности, % ат. С	9–19	Стабильная фаза – α - SiC
Температура плавления, °C	2450 (\approx 18% ат. С)	2830
Общее давление пара, мм рт. ст.	$\approx 0,5$ (2000 °C)	$1,41 \cdot 10^{-4}$ (2000 °C) Давление Si, $1 \cdot 10^{-4}$ (2000 °C) мм рт. ст
Теплопроводность, Вт/(м·К)	25 (20 °C) 15 (1000 °C) ≈ 15 (1500 °C)	α - SiC 47 (1000 °C) 31 (1500 °C) β - SiC 40 (1000 °C) 30 (1500 °C)
Модуль упругости, ГПа	480 (горячепрессованный, пористость 4%)	α - SiC 438,0 β - SiC 432,4

Для спекания карбида кремния были использованы добавки Al_2O_3 , CeO и Y_2O_3 . На рисунке 4 приведены данные по влиянию температуры на теплопроводность материала инертной матрицы на основе карбида кремния по сравнению с диоксидом урана.

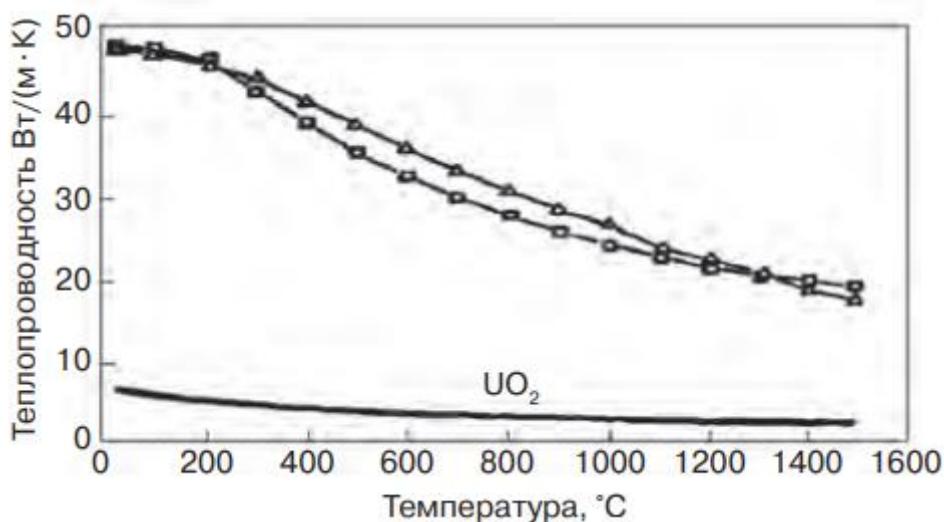


Рисунок 4. Влияние температуры на теплопроводность материала

1.2 Оксид плутония и смешанное уран-плутониевое оксидное топливо

Плутоний образует несколько оксидов от PuO до PuO_2 . Диаграмма состояния системы Pu-O отличается значительной сложностью, в связи с тем что плутоний, как и уран, образует нестехиометрические оксиды, но если для UO_2 характерно сверхстехиометрическое состояние с внедренным в междоузлия кислородом, то PuO_2 легче переходит в достехиометрическое состояние[5].

Кроме PuO_2 в системе Pu-O обнаружен оксид PuO , оксид Pu_2O_3 с кубической решеткой и оксид Pu_2O_3 с гексагональной решеткой. Как показали результаты более поздних исследований, PuO_2 не образует непрерывный твердый раствор при температурах выше 1000°C .

PuO_2 имеет структуру флюорита, изоморфную с UO_2 . Элементарная ячейка содержит 4 атома плутония и 8 атомов кислорода. Период кристаллической решетки равен $5,396 \pm 0,001$ А. Ее рентгенографическая плотность $11,46$ г/см³. PuO_2 легко теряет кислород при повышенной температуре в инертной и восстановительной средах, что сопровождается расширением элементарной ячейки в результате образования иона Pu^{+3} .

Этот эффект заметно проявляется при температурах выше 1100 — 1200°C . После охлаждения до комнатной температуры образуется двухфазный продукт Pu_2O_3 и $\text{PuO}_{1,98}$. Это превращение происходит настолько быстро, что однофазный состав не всегда можно зафиксировать закалкой. Период решетки $\text{PuO}_{1,98}$ равен $5,398 - 5,400$ А. Нагрев смеси Pu_2O_3 и $\text{PuO}_{1,98}$ на воздухе до 800°C приводит к ее окислению до состава PuO_2 .

Изотермическое сечение диаграммы U-Pu-O при комнатной температуре показано на рисунке 5.

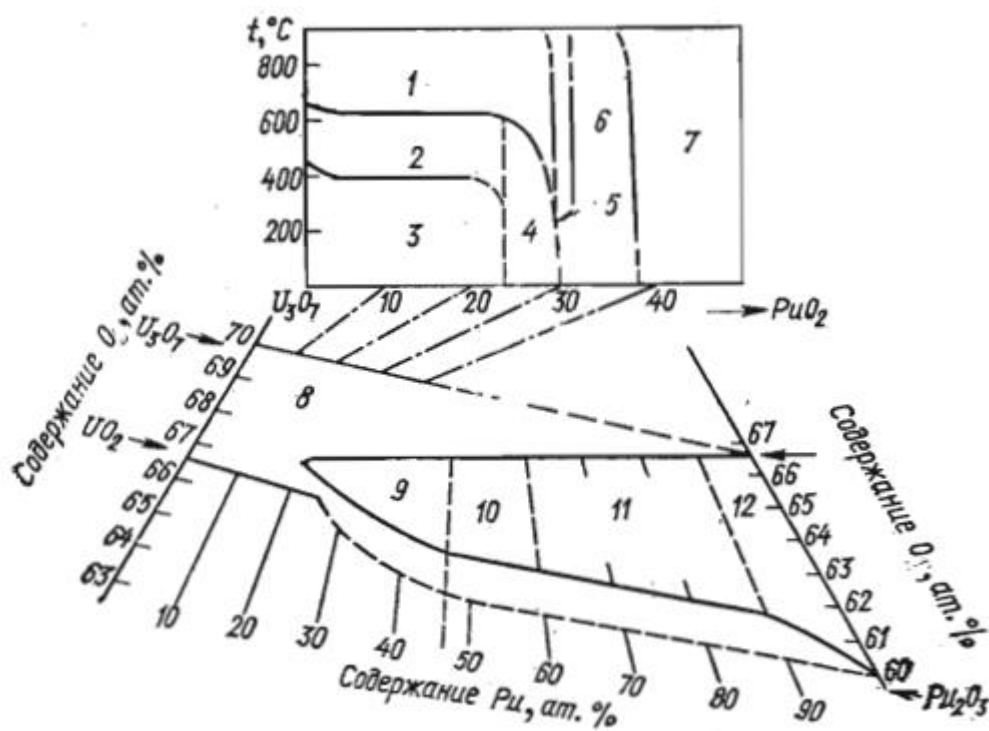


Рисунок 5. Изотермическое сечение системы U–Pu–O при низкой (комнатной) температуре

Эти результаты получены на медленно охлажденных до комнатной температуры образцах, затем отожженных при 200°C и опять медленно охлажденных.

Достехиометрические смешанные оксиды урана и плутония получаются при частичном восстановлении водородом, содержащим некоторое количество воды. Полное восстановление происходит в среде чистого водорода. Для отношения $Pu/(Pu+U) > 0,2$ обнаружена область с двумя гранецентрированными кубическими фазами, одна из которых содержит Pu(IV), вторая — вероятно, полностью восстановленный Pu(III). Область, простирающаяся от гранецентрированной до объемноцентрированной фазы, находится в пределах от 45 до 50% PuO₂.

Имеется большая однофазная область с структурой объемноцентрированного куба в пределах отношений $Pu/(U+Pu)$ 0,5–0,97. Смешанные оксиды, восстановленные в чистом водороде при 1800°C, содержат металлическую фазу, когда охлаждение проводится в вакууме; при этих условиях U+4 может восстанавливаться в соответствии с бинарной

системой U–O. Эта металлическая фаза находится в равновесии с гранецентрированной или объемноцентрированной фазами и, вероятно, также с гексагональной фазой системы Pu–O. Исследованное бинарное сечение UO_2 – PuO_2 показано в верхней части рисунка 5.

1.2.1 Получение смешанного оксидного топлива

Характеристики порошков PuO_2 , как и UO_2 , зависят от технологии их изготовления и в большей степени от температуры прокаливания: ее повышение приводит к огрублению порошка: увеличиваются размер его частиц и насыпной вес, а также снижается химическая активность.

При разработке плутониевого топлива был использован опыт, накопленный в производстве изделий из UO_2 . Все технологические процессы изготовления плутониевых ТВЭЛов осуществить труднее, и, следовательно, они дороже соответствующей технологии для урановых ТВЭЛов. Это объясняется наличием прямого излучения и высокой радиотоксичностью продукта. В связи с этим требуется использование приемов дистанционного ведения технологического процесса и дополнительная защита от излучения. Чтобы оправдать значительные капиталовложения в обеспечение безопасных условий работы персонала, необходима соответствующая производительность установок по изготовлению плутониевых ТВЭЛов: для смешанного оксидного топлива она оценивается примерно 30 т/год. Предполагается, что увеличение стоимости производства при использовании плутониевого топлива составит около 100% по сравнению с существующей стоимостью производства топлива из U^{235} .

1.2.2 Изготовление таблеток

Наибольшая часть смешанного оксидного топлива используется в виде таблеток, приготовленных прессованием и спеканием. Существенными являются следующие характеристики таблеток: плотность, содержание плутония, равномерность распределения плутония, отношение O/Me,

содержание влаги, газа и других металлических и неметаллических примесей. Большое внимание уделяется контролю микроструктуры таблеток, от которой зависит радиационное поведение материала.

Исходный материал для приготовления таблеток из смешанного оксидного топлива может быть приготовлен путем механического перемешивания порошков UO_2 и PuO_2 либо путем совместного осаждения оксидов из водных растворов их солей, например из нитратных растворов, с последующим восстановлением прокаленного осадка. Выбор способа в значительной мере зависит от требований к микрогомогенности распределения плутония в материале и от физических свойств порошков UO_2 и PuO_2 .

Смеси оксидов получают осаждением из растворов смесей диураната аммония и гидрооксидов плутония с последующей фильтрацией, сушкой, прокаливанием, восстановлением в водороде для получения продукта с соотношением $\text{O/Me}=2,00$ и агломерацией для обеспечения текучести порошка[6].

Разработан непрерывный процесс разложения U/Pu нитратов в кипящем слое, состоящий из двух этапов: денитрирование при 375°C нитратных растворов с получением смеси порошка $\text{UO}_3\text{--PuO}_2$ и последующее восстановление водородом при 600°C до $\text{UO}_2\text{--PuO}_2$. [7] Получаемый таким способом продукт имеет следующие характеристики: средний размер частиц 100–500 мкм, незначительное загрязнение продукта материалом реактора (содержание никеля, железа и хрома в продукте 5, 50–60 и 4 млн. соответственно). Таблетки, спрессованные без связки при давлении 5700 кгс/см^2 и спеченные при 1850°C , имели плотность 87% теоретической (ТП).

Порошки смесей оксидов, приготовленные методом соосаждения, обеспечивают получение спеченных таблеток с высокой равномерностью распределения плутония[8]. Однако считается, что этот метод для производства топлива в больших масштабах, например для промышленных

энергетических реакторов, экономически менее выгоден по сравнению с методом механического перемешивания порошков оксидов UO_2 и PuO_2 . Вместе с тем следует иметь в виду, что использование соосажденных смесей не требует полного разделения урана и плутония при переработке отработавших ТВЭЛов, что благоприятно скажется на стоимости внешнего топливного цикла.

Твердый раствор $\text{UO}_2\text{--PuO}_2$, образующийся в процессе спекания таблеток, спрессованных из механически смешанных порошков, имеет некоторую неравномерность распределения концентраций компонентов в малых объемах, что может приводить к ухудшению нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора. Дополнительные технологические операции выравнивания концентрации компонентов в топливе удорожают процесс.

Порошки смесей оксидов, обеспечивающие необходимую плотность при спекании, имеют малый размер частиц и обладают плохой текучестью, поэтому перед прессованием их подвергают грануляции на автоматических прессах. Для грануляции может быть использован мокрый процесс, при котором органическое связующее в виде раствора перемешивают с порошком оксидов и после сушки его гранулируют протиранием через сетку, или сухой процесс, при котором порошок предварительно прессуют при давлении несколько меньшем, чем при последующем прессовании таблеток, а затем гранулируют. В этом случае гранулированный порошок перемешивают с сухой связкой перед прессованием таблеток для уменьшения трения прессуемого материала о стенки пресс-формы и облегчения выталкивания таблетки из пресс-формы.

Мокрый процесс грануляции имеет следующие недостатки:

- 1) Размер обрабатываемой партии продукта в целях ядерной безопасности должен быть ограничен, так как добавляемый раствор связующего является материалом, замедляющим нейтроны;
- 2) Увеличивается продолжительность процесса, в связи с тем, что

растворитель связующего необходимо удалять при сравнительно низких температурах, при которых не происходит значительного испарения связующего и окисления оксида урана;

3) Скорость увеличения температуры при спекании должна быть ограничена, особенно в начальной стадии, во избежание разрушения таблеток ввиду слишком интенсивного испарения связующего.

Однако брак при прессовании таблеток (сколы, трещины, конусность, бочкообразность и т. д.) после мокрого процесса грануляции встречается гораздо реже, чем после сухого. В связи с этим мокрую грануляцию используют в том случае, когда необходимо высокое качество таблеток. Технологические процессы прессования таблеток из смешанного топлива $\text{UO}_2\text{--PuO}_2$ не имеют отличий от аналогичных процессов для UO_2 .

Температура спекания таблеток обычно составляет $1500\text{--}1700^\circ\text{C}$. В процессе спекания происходит улучшение гомогенности состава, удаление летучих примесей, адсорбированных газов и органического связующего. Для образования твердого раствора $(\text{U, Pu})\text{O}_2$ из механически перемешанных порошков UO_2 и PuO_2 требуется несколько часов выдержки.

На процесс спекания существенно влияет газовая среда, что связано с различием в сродстве урана и плутония к кислороду и водороду. При спекании в восстановительной атмосфере образуется двухфазная структура твердых растворов $\text{UO}_2\text{--PuO}_2$, причем состав твердых растворов зависит от режимов спекания.

При спекании обычно достигается плотность таблеток равная 93 – 96% теоретической, однако в некоторых случаях есть необходимость получения низкоплотных (87% от теоретической плотности) таблеток из $(\text{U, Pu})\text{O}_2$. В связи с этим разрабатываются методы, позволяющие регулировать плотность таблеток во время спекания. Один из способов предусматривает развитие макропористости в спекаемом материале за счет испарения добавляемых к нему органических материалов, например стеарата цинка, однако при использовании этого способа трудно обеспечить стабильность конечной

плотности таблеток. Лучшие результаты были достигнуты путем снижения активности порошкообразного материала предварительной термообработкой в среде углекислого газа при температурах до 820°C (Рисунок 6).

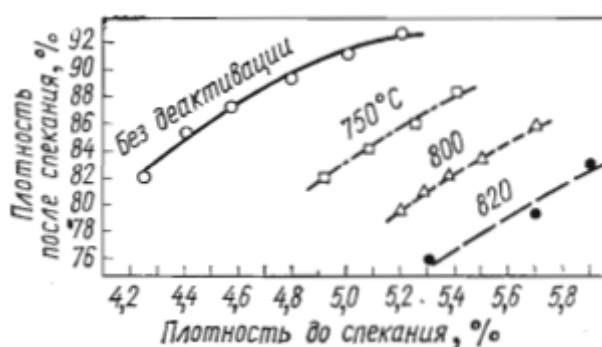


Рисунок 6. Влияние дезактивационной температуры на плотность таблеток, спеченных при 1600°C в течении 4 ч в атмосфере Ar+5% об.Н₂

1.2.3 Поведение PuO₂ и PuO₂ – UO₂ под облучением

Значительные изменения, которые претерпевает смешанное оксидное топливо под облучением, как и в случае UO₂, определяются прежде всего теплофизическими характеристиками. Низкая теплопроводность топлива приводит к возникновению большого температурного градиента в радиальном направлении цилиндрического ТВЭЛа. Даже при малых диаметрах, которые имеют ТВЭЛы быстрых реакторов (около 5 мм), в центре топлива топлива развиваются температуры выше 2000 °C при температурном градиенте около 1000 °C/мм [1468].

Большой температурный градиент, который развивается в топливе в процессе облучения, способствует перестройке исходной структуры топлива и перераспределению его компонентов. При поперечном отводе тепла, происходят не только перенос материала и миграция пор в направлении температурного градиента, но и изменение концентрации U и Pu. Скорость и полнота этих процессов зависят от режимов облучения, исходной структуры и пористости топлива, а также от его химического состава.

В смешанном оксидном топливе с низкой концентрацией PuO₂ (менее 5%) перестройка структуры происходит без каких-либо особенностей по

сравнению с UO_2 , поскольку низкое содержание в смеси PuO_2 практически не отражается на температуре плавления, теплопроводности и кислородном потенциале топлива. Радиально ориентированные стабильные зерна быстро образуются при 1700°C в результате интенсивного движения пор в область более высоких температур по температурному градиенту в результате процессов испарения и конденсации. Образование центральной полости является следствием миграции пор к температурному центру сердечника ТВЭЛа. Кинетика перестройки структуры зависит от исходного числа пор в топливе, и в связи с этим наблюдается разница в кинетике перестройки структуры таблеточного и виброуплотненного топлива.

Высокие тепловые нагрузки и температура топлива приводят к его плавлению в центральной части. Так, плавление в таблеточном топливе наблюдается при линейной мощности, эквивалентной 60 Вт/см, и приблизительно при 50 Вт/см в виброуплотненном топливе (температура поверхности топлива 500°C). При исследовании микроструктуры зона расплавленного топлива видна как хорошо очерченная область с мелкозернистой структурой и сферическими или трубчатыми пора́ми, ориентированными в радиальном направлении.

Перестройка структуры топлива сопровождается повышением его плотности и, следовательно, повышением теплопроводности и изменением температурного профиля в радиальном направлении, уменьшением максимальной температуры. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что для различных видов исходного топлива (таблетированного и виброуплотненного) происходит сближение максимальных температур сердечника ТВЭЛа и профиля распределения температур по радиусу.

С повышением концентрации PuO_2 в смешанном топливе перестройка структуры под облучением происходит более интенсивно и полно и, как результат, понижается температура центра. Так например при прочих равных условиях расчетная максимальная температура смешанного оксидного топлива при 623 Вт/см в тепловом реакторе оказалась на 180° ниже, чем

топлива из UO_2 .

Уплотнение смешанного топлива в процессе облучения происходит и в не подверженных структурным изменениям зонах даже при низких выгораниях (до 30000 МВт/т) и температура 1000 – 1400 К. Объемное уменьшение пор зависит от характеристики исходной пористости и, следовательно, может регулироваться при изготовлении топлива.

Отмечается большая проводимость контакта топливо – оболочка для виброуплотненного топлива.

В процессе облучения смешанного окидного топлива происходит перераспределение урана и плутония в топливном стержне прежде всего в радиальном направлении. Наиболее вероятным механизмом миграции актиноидов является перенос материала в паровой фазе под действием высоких температур и температурного градиента. Скорость и степень перераспределения зависят от отношения Pu/U в паровой фазе над конденсированным топливом и от наличия и характера пористости. Значительную роль в перераспределении актиноидов в направлении температурного градиента играют радиальные трещины. Миграция происходит путем избирательного испарения урана и плутония с горячих поверхностей пор и трещин в топливе и конденсации на более холодных поверхности.

1.2.4 Применение PuO_2 и $(\text{U},\text{Pu}) \text{O}_2$ в ядерных реакторах

Развитие ядерной энергетики обусловило рост количества производимого в водородных реакторах плутония. На каждые 4 МВт мощности атомной электростанции в год выделяется 1 кг плутония. В 1972 г. впервые мировое производство плутония стало превышать потребность в нем для исследований и экспериментов, а в 1975 г. во всех странах с развитой ядерной энергетикой начинается накопление плутония для энергетических целей. Темп производства плутония в западных странах будет иметь почти экспоненциальный характер и в начале 80-х годов составит примерно

100 т/год делящегося плутония.

Большое количество плутония, которое начинает накапливаться, в ближайшем будущем позволит реализовать программу его эффективного использования в легководных реакторах и особенно в реакторах на быстрых нейтронах. Для реализации этих программ создаются плутониевые лаборатории, рассчитанные на работу с высокоактивными образцами и облученными ТВЭЛами. Исследования подкрепляются экспериментами по облучению в реакторах с большим потоком нейтронов и в критических сборках.

Большая программа по облучению ТВЭЛов с виброуплотненным и таблетированным горючим из $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$ выполнена на реакторе «Сакстон» (США). Вторая загрузка этого реактора содержала топливо состава $\text{UO}_2 - 6.6\% \text{ PuO}_2$ в девяти сборках (638 ТВЭЛов), в том числе 490 ТВЭЛов с таблеточными сердечниками (плотность $94 \pm 2\%$) и 148 ТВЭЛов с виброуплотненным топливом (плотность $87 \pm 1\%$); примерно 1/20 часть ТВЭЛов имела оболочки из нержавеющей стали 304, а остальные из сплава циркония.

Достигнутая глубина выгорания составила 29000 МВт–сутки/т для АЭС «Сан-Онофр» (США); начиная с 1970 г. было изготовлено 734 ТВЭЛа с плутоний содержащим топливом. В кипящем реакторе EBWR (США) впервые смешанное топливо $\text{UO}_2 - 1,5\% \text{ PuO}_2$ было испытано в 1966 г. в виде ТВЭЛов с виброуплотненным сердечником в оболочке из циркония. Достигнутое выгорание составило 18000 МВт–сутки/т, линейная мощность ТВЭЛов 1280 Вт/см. В состав третьей загрузки кипящего реактора «Холден» (1967 г.) вошли опытные ТВЭЛы с виброуплотненным таблетированным сердечником из $\text{UO}_2 \text{ PuO}_2$.

Радиационные исследования поведения смешанного оксидного топлива показали, что по своим характеристикам это топливо не уступает UO_2 , и ныне техническая осуществимость плутониевого цикла в реакторах на тепловых нейтронах и создание работоспособного топлива в виде $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$

могут считаться доказанными. Повторное использование плутония в действующих водоводяных реакторах без изменения конструкции активной зоны в настоящее время не представляет трудностей.

Сейчас осуществляется использование оксидного смешанного топлива в реакторах на быстрых нейтронах АЭС. Топливо состава $UO_2 + (15-20)\% PuO_2$ предполагается использовать в реакторах БН-350 и БН-600 (СССР). Вступили в строй действующих демонстрационные АЭС «Феникс» (Франция) и PFR (Англия). В первую загрузку реактора вошли как ТВЭЛы с таблетированным, так и с виброуплотненным сердечником; было изготовлено 4,5 т таблеток и 0,6 т гранулята для вибротвэлов.

Конечной целью этих работ является создание экономически выгодных реакторов на быстрых нейтронах электрической мощностью 1000–1500 МВт. Первая партия стержней с топливом в виде твердого раствора $UO_2 - PuO_2$ для быстрого реактора LMFBR (США) была облучена до выгорания 50000 МВт–сутки/т в потоке быстрых нейтронов в реакторе EBR-II (США) при линейном тепловыделении 500—530 Вт/см и максимальной температуре оболочки 650°C.

2 Расчетная часть

2.1 Расчет показателей горючести водно-органических нитратных растворов и определение оптимальных составов.

В таблице 7 приведены значения низшей теплотворной способности Q_n^c выбранных нами горючих компонентов в составе водно-органических нитратных растворов.

Таблица 7. Показатели горючести органических веществ

Параметр	Вещество				
	Метанол	Этанол	Пропанол	Бутанол	Ацетон
Q_n^c , МДж/кг	19,95	26,80	31,38	33,47	31,54
$T_{вспышки}$, К	284	285	285	302	254
$T_{самовоспл.}$, К	658	619	673	618	738

Для образования сложных оксидных композиций различного состава определены следующие оптимальные по составу растворы ВОНР, имеющие $Q_{нр} \geq 8,4$ МДж/кг:

– ВОНР-1 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 3,8 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 34,3 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 6,9 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «85,5% UO_2 –9,5 % PuO_2 –5,0 % MgO »;

– ВОНР-2 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 7,6 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 34,48 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 6,9 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «85,5% UO_2 –9,5 % PuO_2 –5,0 % MgO »;

– ВОНР-3 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 11,4 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 26,7 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 6,9 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «85,5% UO_2 –9,5 % PuO_2 –5,0 % MgO »;

– ВОНР-4 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 3,24 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 29,3 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 12,45 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «81 % UO_2 –9 % PuO_2 –10 % MgO »;

– ВОНР-5 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 6,5 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 26 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 12,45 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «81 % UO_2 –9 % PuO_2 –10 % MgO »;

– ВОНР-6 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 9,7 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 22,8 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 12,4 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «81 % UO_2 –9 % PuO_2 –10 % MgO »;

– ВОНР-7 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 2,79 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 25,2 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 17 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «76,5 % UO_2 –8,5 % PuO_2 –15 % MgO »;

– ВОНР-8 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 5,6 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 22,4 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 17 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «76,5 % UO_2 –8,5 % PuO_2 –15 % MgO »;

– ВОНР-9 (26,4 % H_2O – 25,0 % C_3H_6O – 8,4 $PuO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 19,6 % $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – 17 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) для композиции «76,5 % UO_2 –8,5 %

PuO_2 –15 % MgO »;

– БОНР-10 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 2,4 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 21,7 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 20,8 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «72 % UO_2 – 8 % PuO_2 –20 % MgO »;

– БОНР-11 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 4,8 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 19,4 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 20,8 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «72 % UO_2 – 8 % PuO_2 –20 % MgO »;

– БОНР-12 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 7,3 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 16,9 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 20,8 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «72 % UO_2 – 8 % PuO_2 –20 % MgO »;

– БОНР-13 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 1,8 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 16,4 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 26,8 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «63 % UO_2 – 7 % PuO_2 –30 % MgO »;

– БОНР-14 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 3,6 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 14,6 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 26,8 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «63 % UO_2 – 7 % PuO_2 –30 % MgO »;

– БОНР-15 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 5,4 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 12,7 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 26,8 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «63 % UO_2 – 7 % PuO_2 –30 % MgO »;

– БОНР-16 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 1,01 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 9,1 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 34,9 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «45 % UO_2 – 5 % PuO_2 –50 % MgO »;

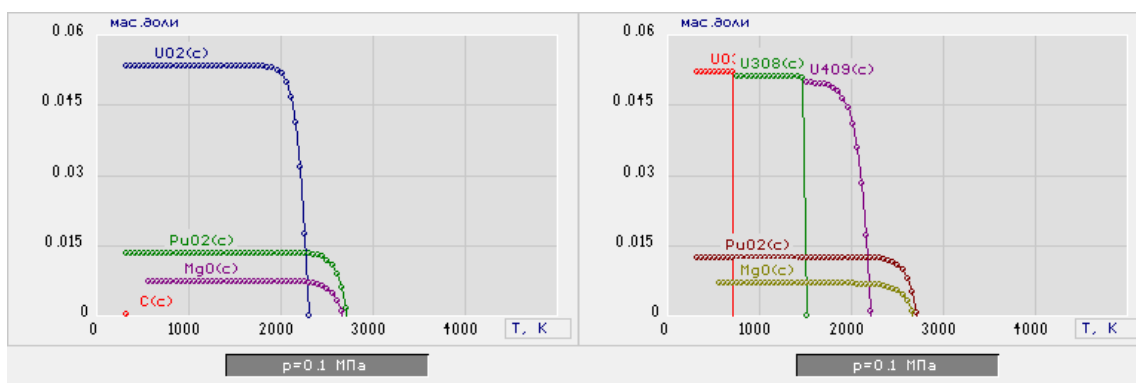
– БОНР-17 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 2 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 8,1 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 34,8 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «45 % UO_2 – 5 % PuO_2 –50 % MgO »;

– БОНР-18 (26,4 % H_2O – 25,0 % $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ – 3 $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 7 % $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 34,9 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для композиции «45 % UO_2 – 5 % PuO_2 –50 % MgO »;

2.2 Термодинамическое моделирование процесса плазмохимической переработки растворов ВОНР

Термодинамические расчеты равновесных составов продуктов плазменной переработки растворов ВОНР проведены с использованием лицензионной программы термодинамического расчета состава фаз произвольных гетерогенных систем «TERRA».

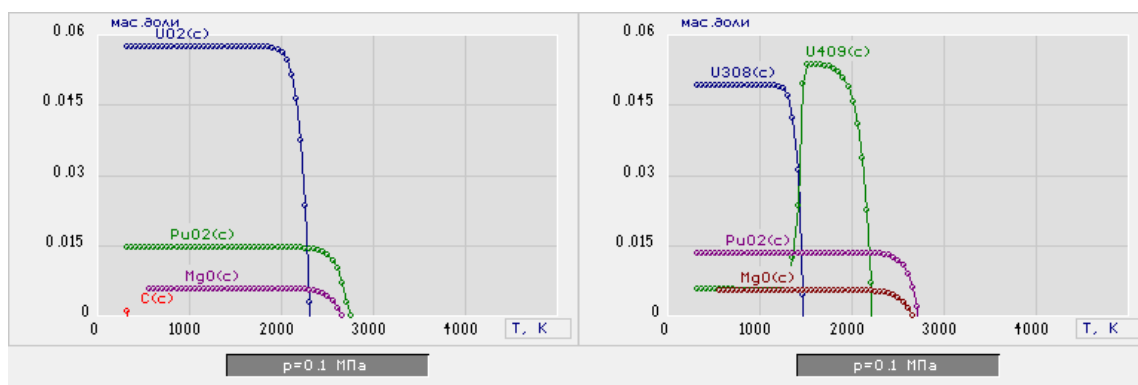
На рисунках 7 – 11 представлены характерные равновесные составы продуктов плазменной переработки растворов ВОНР на основе ацетона.



а)

б)

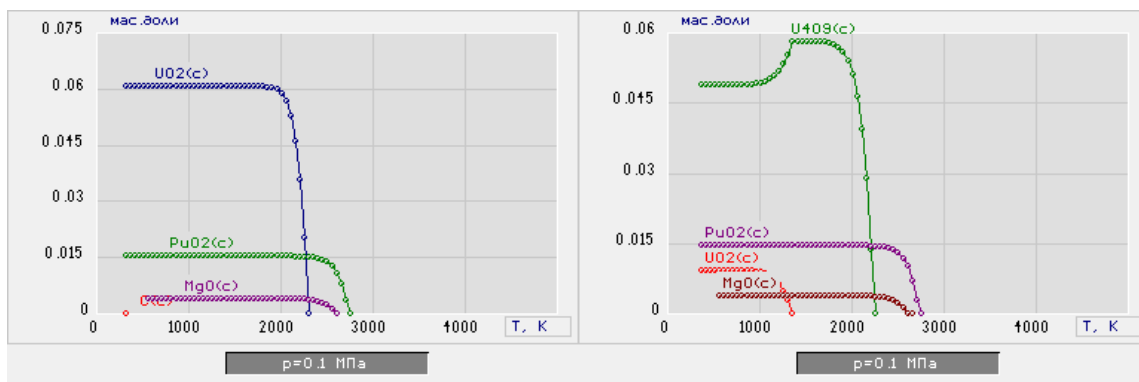
Рисунок 7 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-1 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б).



а)

б)

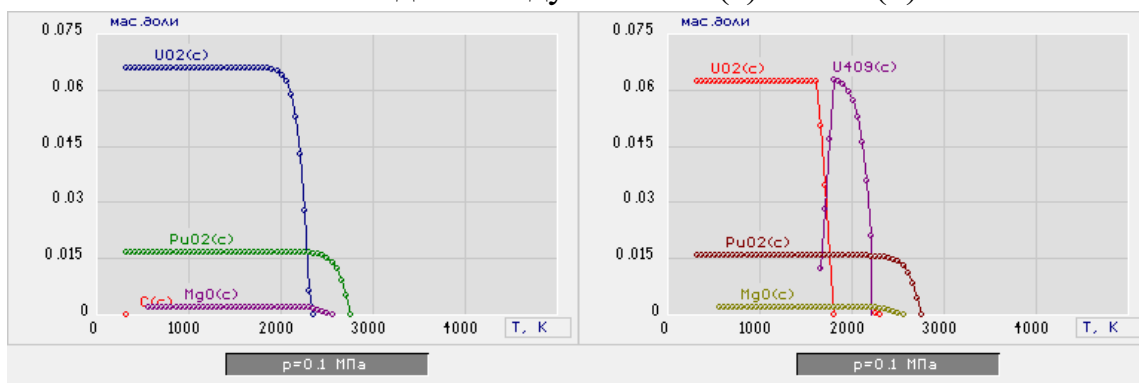
Рисунок 8 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-4 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б).



а)

б)

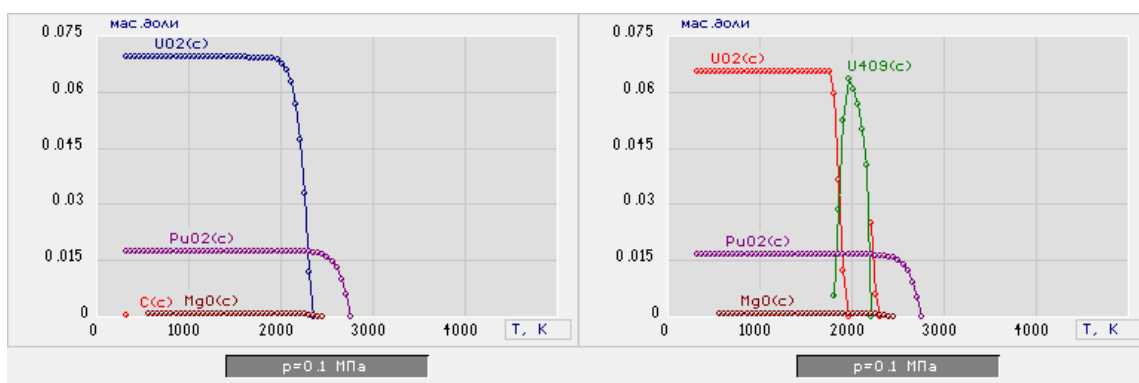
Рисунок 9 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-7 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б)



а)

б)

Рисунок 10 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-9 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б).



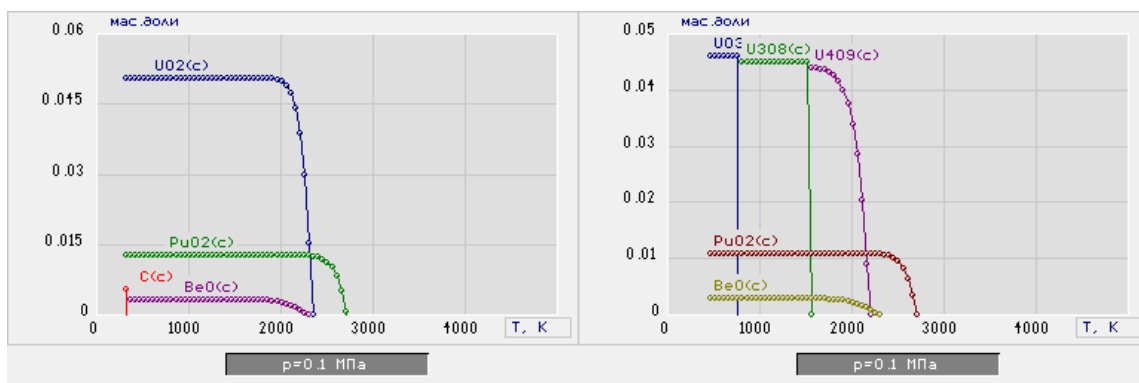
а)

б)

Рисунок 11 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-11 на основе ацетона при массовой доле воздуха 62 % (а) и 65 % (б).

Из анализа равновесных составов продуктов плазменной переработки растворов ВОНР на основе ацетона (рис. 7–11) следует, что при массовой доле воздуха 65% основными продуктами в конденсированных фазах являются оксиды $\text{UO}_2(\text{с})$, PuO_2 и $\text{MgO}(\text{с})$, которые образуют требуемые оксидные композиции, ОК-1, ОК-4, ОК-7, ОК-9 и ОК-11. При этом также образуется углерод $\text{C}(\text{с})$, содержание которого резко возрастает при снижении массовой доли воздуха менее 62%. Повышение массовой доли воздуха с 65% до 70% и более не приводит к образованию углерода $\text{C}(\text{с})$ и не изменяет состав целевых продуктов. Дальнейшее повышение массовой доли воздуха свыше 70% приведет лишь к уменьшению содержания целевых продуктов и снижению производительности данного процесса.

На рисунке 12 представлены характерные равновесные составы продуктов плазмохимической переработки растворов ВОНР на основе этанола при массовой доле воздуха 65% и 70 %.



а)

б)

Рисунок 12 – Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР-16 на основе этанола при массовой доле воздуха 65 % (а) и 70 % (б).

Из анализа равновесных составов продуктов плазменной переработки раствора ВОНР-16 на основе этанола (рис. 12) следует, что при массовой доле воздуха 65% основными продуктами в конденсированных фазах также являются оксиды $\text{UO}_2(\text{с})$, PuO_2 и $\text{MgO}(\text{с})$, которые образуют требуемую оксидную композицию ОК-16. При этом также образуется углерод $\text{C}(\text{с})$,

содержание которого резко возрастает при снижении массовой доли воздуха. Повышение массовой доли воздуха с 65% до 70% не приводит к образованию углерода $C(s)$ и не изменяет состав целевых продуктов. Дальнейшее повышение массовой доли воздуха свыше 70% приведет лишь к уменьшению содержания целевых продуктов и снижению производительности данного процесса.

3 Экспериментальная часть

3.1 Лабораторный стенд для проведения исследований

Экспериментальные исследования процесса синтеза топливных ОК в воздушно-плазменном потоке проводились при использовании лабораторного стенда «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01», представленном на рисунке Б1 (Приложение Б).

В состав плазменного стенда входит высокочастотный генератор с рабочей частотой 13,56 МГц и колебательной мощностью до 60 кВт [9]. Генерируемая энергия передается от него на охлаждаемый водой медный электрод ВЧФ-плазмотрона, через разрядную камеру которого продувается плазмообразующий газ – воздух. Среднемассовая температура воздушной плазменной струи, генерируемой ВЧФ-плазмотроном, не превышает 4000 К. Кварцевая трубка (длина – 0,86; диаметр – 0,05 м) выполняет функцию разрядной камеры плазмотрона [10].

Через реактор и ВЧФ-плазмотрон осуществляется прокачка воздуха при помощи высоконапорного вытяжного вентилятора. Закрутка поступающего в разрядную камеру потока воздуха осуществляется импеллером, который расположен в узле ввода, расположенном на входе в плазмотрон. Постоянная входная площадь импеллера ($S_{\text{ип}}$) составляет 0,0025 м². Импеллер реактора снабжен шибером, с помощью которого регулируется входная площадь импеллера ($S_{\text{им}}$) в диапазоне от 0 до 1650 см².

Работающий реактор является источником загрязняющих веществ,

например монооксиды углерода и азота, диоксиды азота и серы и углеводороды. Для контроля их содержания в отходящих газах используются газоанализатор и пробоотборник. Значения скоростей воздушного потока в ВЧФ-плазмотроне и газоходе (диаметр – 0,25 м, площадь ($S_{гхд}$) – 0,05 м²) измеряются трубкой Пито.

Измерение температуры горения диспергированных ВОНР в реакторе осуществляется бесконтактным способом по линии поглощения образующегося СО₂ при помощи высокоточного цифрового пирометра ІРЕ-140/45.

3.2 Определение расхода плазмообразующего газа через разрядную камеру ВЧФ-плазмотрона

Расход воздуха через воздуховод определяется с помощью трубки Пито (рисунок 15).

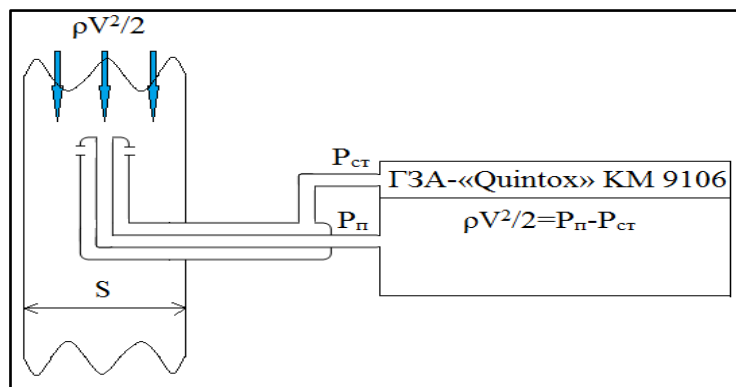


Рисунок 15 – Схема определения расхода воздуха в воздуховоде с помощью трубки Пито

Трубка Пито измеряет напор, создаваемый набегающим потоком воздуха по следующей формуле [11]:

$$f = \frac{\rho V^2}{2} = P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{п}}$ – полное давление, Па;

$P_{\text{ст}}$ – статическое давление, Па;

ρ – плотность воздуха при температуре T , кг/м³;

$f = \frac{\rho V^2}{2}$ – напор, создаваемый набегающим потоком воздуха.

Из формулы 3 определяется скорость набегающего потока:

$$V = \left[\frac{2(P_{\text{п}} - P_{\text{ст}})}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Далее рассчитывается объёмный (или массовый) расход воздуха через воздуховод по формуле:

$$Q = S \cdot V, \quad (5)$$

где S – площадь поперечного сечения воздуховода.

Графики зависимости напора, создаваемым набегающим потоком воздуха, от величины входной площади шибера реактора приведены на рисунках 16, 17.

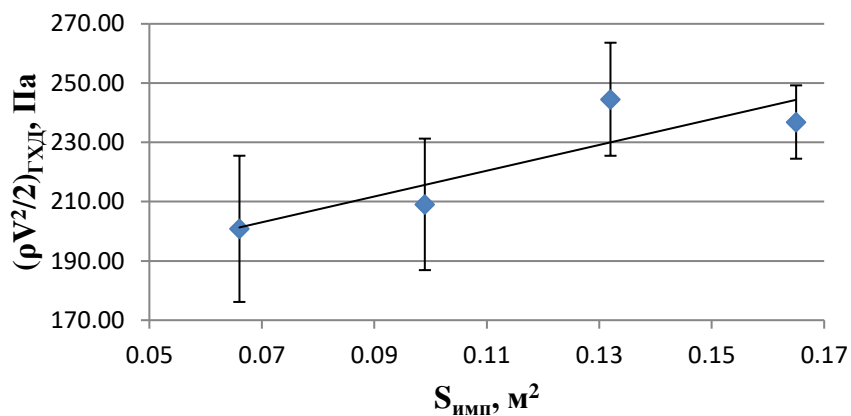


Рисунок 16 – Влияние входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в газоходе

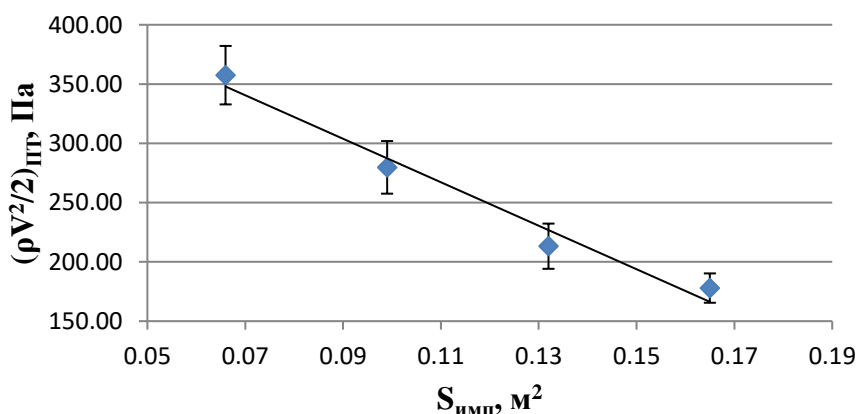


Рисунок 17 – Влияние входной площади импеллера реактора на напор, создаваемый набегающим потоком воздушного теплоносителя в разрядной камере ВЧФ-плазмотрона

В таблице Г1 и Г2 (Приложение Г) приведены результаты измерений расходов воздуха через газоход и ВЧФ-плазмотрон. По результатам полученных данных были построены графики расхода плазмообразующего газа (воздуха) через ВЧФ-плазмотрон ($Q_{пт}$), а также воздушного теплоносителя через газоход ($Q_{гхд}$) в зависимости от величины входной площади импеллера реактора. Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздуха через ВЧФ-плазмотрон и газоход представлено на рисунках 18 и 19.

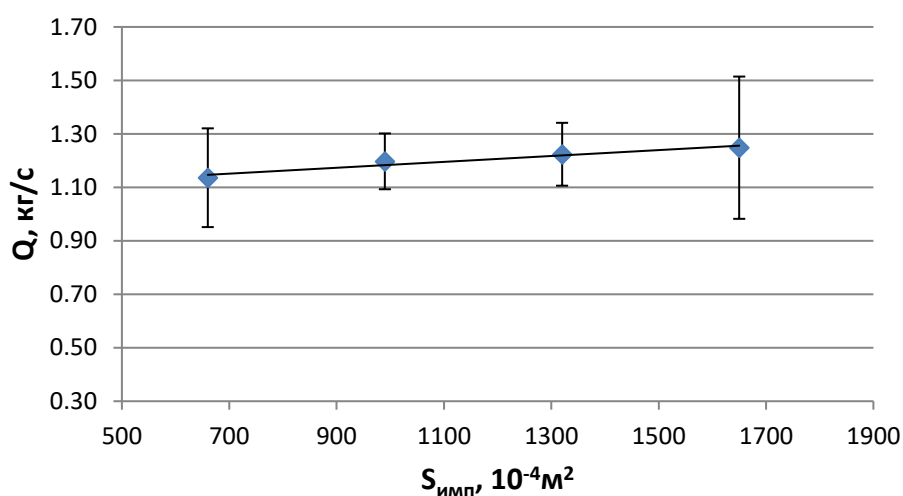


Рисунок 18 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон

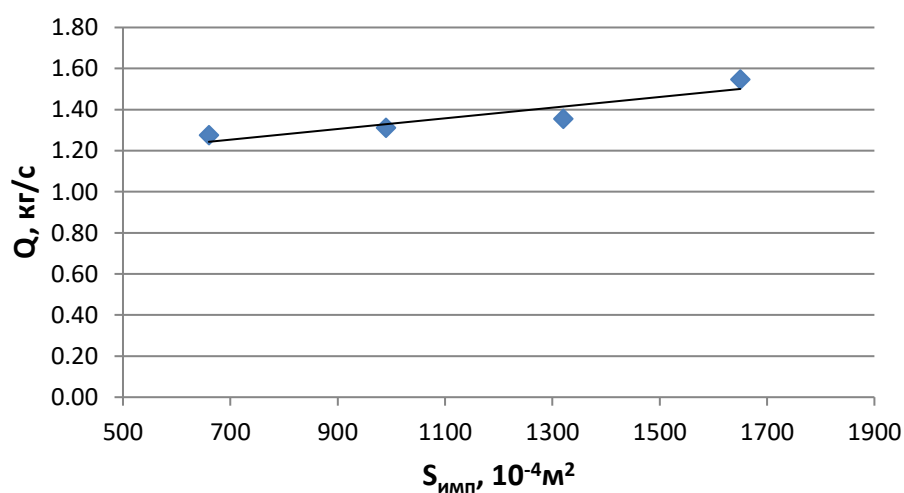


Рисунок 19 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через газоход

3.2 Расчет расхода газа через реактор

Для расчета расхода воздуха через реактор использовалось следующее выражение:

$$Q_P = Q_{ГХД} - Q_{ПТР}, \quad (6)$$

где Q_P – расход воздушного теплоносителя через реактор, кг/с;

$Q_{ГХД}$ – расход воздушного теплоносителя через газоход, кг/с;

$Q_{ПТР}$ – расход плазмообразующего газа через ВЧФ-плазмотрон, кг/с.

В таблице Д3 (Приложение Д) приведены результаты расчета расхода воздуха через реактор.

В результате расчетов получена зависимость расходов воздушного теплоносителя через реактор плазменного стенда в зависимости от входной площади импеллера реактора. С помощью полученных данных был построен график зависимости расхода газа через реактор от площади шибера, который представлен на рисунке 20.

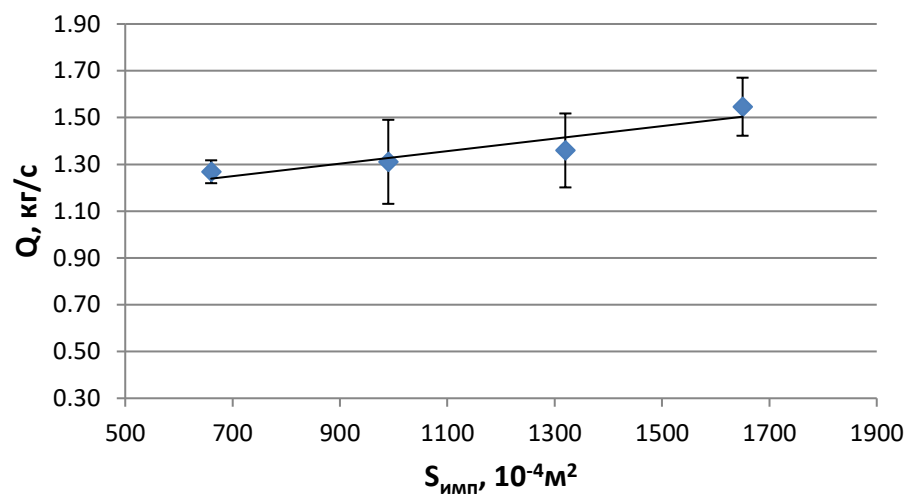


Рисунок 20 – Влияние входной площади импеллера реактора на массовый расход воздушного теплоносителя через газоход

Полученная зависимость позволяет за счет изменения шибера входной площади импеллера реактора осуществлять плавную регулировку расхода воздушного теплоносителя через реактор и плазмотрон.

3.3 Расчет основных технологических параметров установки

Результаты расчета основных технологических параметров установки приведены в таблице Е1 (Приложение Е).

При расчете технологических параметров работы установки использовались следующие соотношения.

Мощность, потребляемая ВЧГ от промышленной сети:

$$P_0 = I_a U_a, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где I_a – ток анода, А;

U_a – напряжение на аноде генераторной лампы, кВ.

Мощность, выделяемая на различных узлах установки (анод генераторной лампы (а), сеточная индуктивность (с), электрод (э), корпус (к)):

$$P_i = m_i C \Delta t_i \cdot 4,186, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где m_i – массовый расход охлаждающей воды, кг/с;

C – теплоемкость воды, ккал/кг·°С,

Δt_i – изменение температуры охлаждающей воды, °С.

Мощность ВЧФ-разряда рассчитывалась по формуле:

$$P_p = P_0 - (P_a + P_c + P_{\text{э}}), \text{ кВт}. \quad (9)$$

Мощность плазменной струи есть разность между мощностью ВЧФ-разряда и мощностью, выделяющейся на корпусе плазмотрона:

$$P_{\text{ст}} = P_p - P_{\text{к}}, \text{ кВт}. \quad (10)$$

Энтальпия плазменной струи:

$$H = H_0 + \frac{P_{\text{разр}}}{Q_{\text{пг}}}, \text{ кДж/кг}, \quad (11)$$

где H_0 – энтальпия газовой смеси при температуре 300 К;

$Q_{\text{пг}}$ – массовый расход плазмообразующего газа, кг/с.

Коэффициент полезного действия ВЧФ-плазмотрона:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{ст}}}{P_p} \right) \cdot 100, \%. \quad (12)$$

Установочный коэффициент полезного действия плазменного стенда:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{ст}}}{P_0} \right) \cdot 100, \% \quad (13)$$

Температуру плазменной струи определяем с помощью графической зависимости энтальпии воздуха от его температуры, представленной на рисунке Е1 (приложение Е).

3.4 Плазмохимическая переработка модельных растворов

Для исследования возможности проведения процесса синтеза порошков высокой степени дисперсности в воздушной высокочастотной плазме в форме гомогенных по составу уран-плутоний оксидных композиций было проведено экспериментальное изучение процесса на модельных азотнокислых растворах с использованием имитаторов. Для подготовки растворов ВОНР использовались соли нитрата самария ($\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) вместо нитрата плутония, нитрата неодима ($\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) вместо нитрата урана, а также соль нитрата магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для образования матрицы в виде оксида магния в составе ОК. Использование самария и неодима объясняется тем, что он находится в одной группе периодической таблицы с плутонием и ураном, а в растворах формирует сложные ионы, сходные по свойствам с делящимся элементом.

В качестве горючего органического компонента использовался ацетон. Это объясняется тремя факторами: высокой теплотворной способностью, высокой взаимной растворимостью, а также доступностью.

Вначале готовился с использованием дистиллированной воды (1 л) водный нитратный раствор (ВНР) из нитратных солей металлов и смешивался с органическим компонентом (3 л) с получением раствора ВОНР. Предварительно подготовленные растворы ВОНР подавались с постоянным расходом (300 л/ч) на диспергатор 1 (рисунок Г1) и далее в диспергированном виде поступали в реактор, где в процессе переработки в воздушно-плазменном потоке осуществлялся плазмохимический синтез простых и сложных ОК при температуре $T_p \geq 1000^\circ\text{C}$. Контроль температуры

T_p осуществлялся высокоточным цифровым инфракрасным пирометром 14 (IRE 140/45) по линии поглощения диоксида углерода. После реактора пыле-парогазовая смесь поступала на центробежно-барботажные аппараты узла «мокрой» очистки отходящих газов 8, где происходило ее резкое охлаждение (закалка) обратной технологической водой (ОТВ) с получением водных суспензий из полученных ОК. Очищенные отходящие газы забирались высоконапорным вытяжным вентилятором и выбрасывались в атмосферу. Полученные водные суспензии ОК помещали в емкости из нержавеющей стали, отбирали пробы для определения гранулометрического состава суспензий методом лазерной дифракции (ЛД). Затем водные суспензии ОК отстаивали, полученные осадки отделяли, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре 120-150 °С. В таблице Е1 (Приложение Е) приведены составы и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические и технологические свойства полученных простых и сложных оксидных композиций, моделирующих в воздушно-плазменном потоке плазмохимического синтез ОК для уран–плутониевого ДЯТ.

3.5 Анализ полученных результатов

Исследования морфологических, структурных, кристаллических и технологических свойств порошков ОК проводили на базе аналитического оборудования Центра коллективного пользования НОИЦ НМНТ ИШНПТ ТПУ (3140 – Научно-образовательный инновационный центр «Наноматериалы и нанотехнологии», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»).

Для определения гранулометрического состава частиц ОК в полученных водных суспензиях использовали метод лазерной дифракции (метод ЛД), реализованный на приборе SALD-7101 (Shimadzu, Япония). Для сопоставления с режимами и другими свойствами порошков использовали

количественный результат в виде медианного значения полученного распределения, равного широко применяемому в производстве техническому параметру « D_{50} ». Поскольку использованный метод позволяет определить размер частиц в суспензии (взвеси), независимо от их структурного строения, включая жёсткие агломераты, этот результат использовали для определения степени агломерации исследуемых порошков ОК.

Величину удельной поверхности исследуемых порошков ОК оценивали методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ-анализ) на приборе Сорби-М (ЗАО «МЕТА», Россия). Полученные данные пересчитывали в размер частиц, исходя из предположения об их сферической геометрии.

Рентгенофазовый анализ (РФА) исследуемых порошков ОК проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) с применением стандартной базы данных кристаллических структур неорганических материалов PDF-4, в свободно распространяемом программном обеспечении PowderCell по алгоритму Ритвельда для полнопрофильного анализа рентгеновских дифрактограмм. Определяли фазовый состав порошков ОК, параметры кристаллической структуры обнаруженных фаз, а также средние размеры областей когерентного рассеяния (ОКР, кристаллитов). Отношение последних к размеру частиц ОК по данным БЭТ-анализа характеризует морфологию и развитость поверхности частиц и может быть выражено количественно коэффициентом гигроскопичности K : форма частиц, для которых этот коэффициент меньше или приближается к единице, близка к равноосной; коэффициент больше единицы характеризует частицы с развитой поверхностью и/или с внутренними порами; коэффициент меньше единицы характеризует плотные агломераты, состоящие из нескольких кристаллитов. Степень агломерированности таких частиц количественно характеризует коэффициент агломерации Q , величина которого определяется как отношение размера частиц ОК (метод ЛД) к размеру ОКР (количество кристаллитов на линейном поперечном размере частицы ОК).

На рисунке 21 представлена характерная гистограмма распределения по размерам частиц водной суспензии ОК-8 (метод ЛД), полученной при переработке раствора ВОНР.

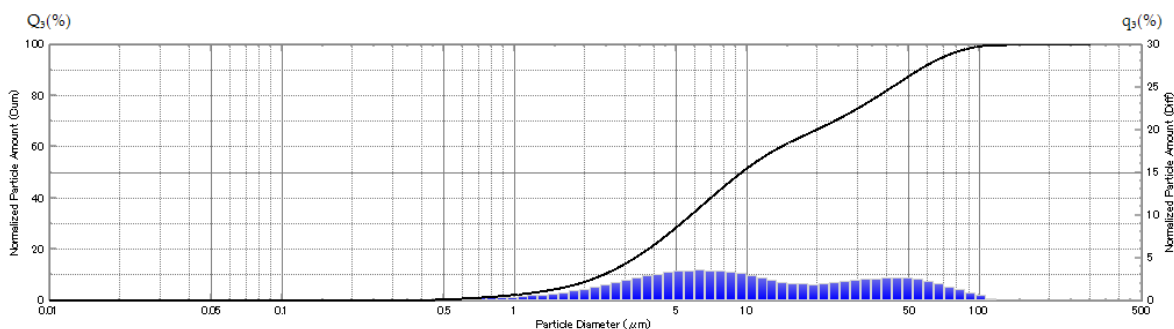


Рисунок 21 – Гистограммы распределения по размерам частиц водной суспензии ОК-8

Исследуемые водные суспензии характеризуются достаточно широким распределением по размерам, распределение для частиц водной суспензии ОК-8 имеет два достаточно выраженных максимума (6 мкм и 45 мкм). Характерные величины медианных значений распределения частиц для ОК-8 лежат в диапазоне от 1–95 мкм. Среднее значение размера частиц D_{50} для ОК-8 составляет 9,4 мкм.

Анализ рентгенограмм образцов порошков после проведения РФА показывает, что основными продуктами проб порошков ОК-8 являются целевые оксиды неодима (Nd_2O_3), самария (Sm_2O_3) и магния (MgO). Средний размер ОКР для проб порошка ОК-8 равен 92 нм.

СЭМ-изображение синтезированных порошков ОК-8 представлено на рисунке 22

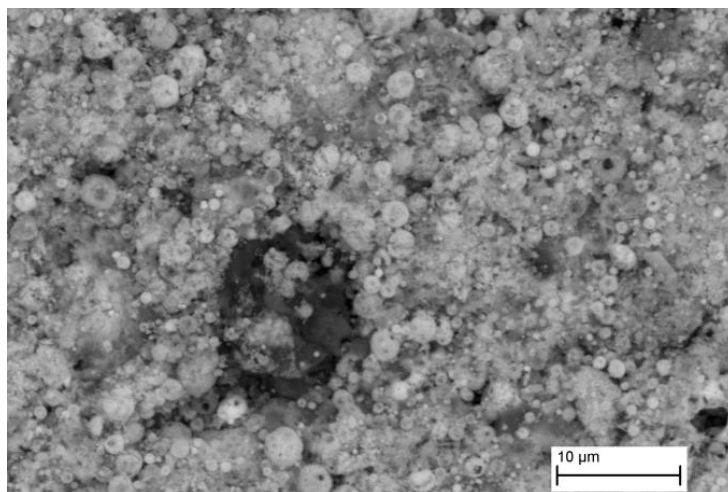


Рисунок 22 – СЭМ-изображение морфологической структуры частиц порошка ОК-8

Анализ СЭМ-изображений подтверждает достаточно широкий диапазон размеров частиц, наличие различных фаз, мелких плотных частиц. Микроскопия показывает, что форма частиц – округлая.

Величина площади удельной поверхности по методу БЭТ для проб ОК-8 составила $15,3 \text{ м}^2/\text{г}$. Полученные значения площади пересчитывались в размер частиц, исходя из предположения об их сферической геометрии. Таким образом, размер частиц, определенный по БЭТ, для ОК-8 составляет 53 нм.

Насыпная плотность исследуемых проб порошков определялась по ГОСТ 27801-93 и для ОК-8 составила $0,473 \text{ г}/\text{см}^3$. Свойства прессуемости, найденные по результатам прессования порошков, имеют характерные для большинства оксидных материалов значения: уплотняемость порошка ОК-8 составляет 0,091; порошки принадлежат к 4 группе сложности прессования.

Таким образом, производство из этих порошков керамических таблеток возможно при использовании серийно выпускаемого оборудования и пресс-форм из углеродистой инструментальной стали.

Прессование порошковых материалов проводилось в стальной цилиндрической пресс-форме диаметром 10 мм под давлением 400 МПа с последующим спеканием полученных прессовок при температуре $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Микрофотографии спеченной керамики приведены на рисунке 23.

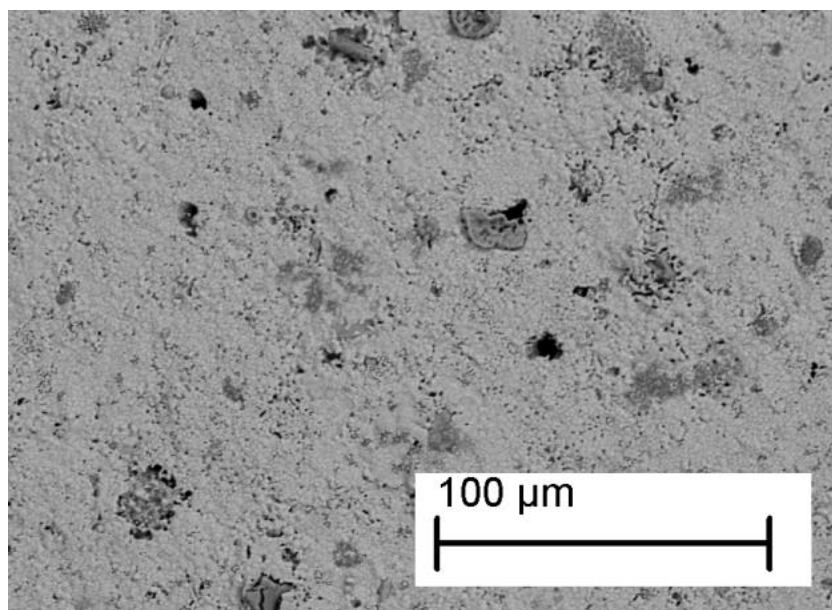


Рисунок 23 – Микрофотографии спеченной керамики из порошков ОК-8

На рисунках 24-28 показано влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц ОК в водных суспензиях (метод ЛД), удельной поверхности и размера кристаллитов в составе полученных порошков ОК – (1-33) (БЭТ-анализ).

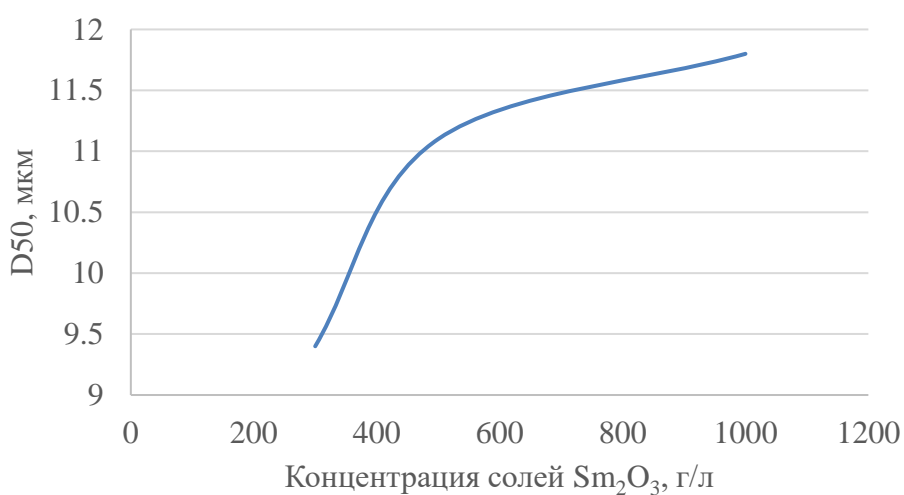


Рисунок 24 – Влияние содержания Sm_2O_3 на размер D50 для ОК–1,2,3 (метод ЛД)

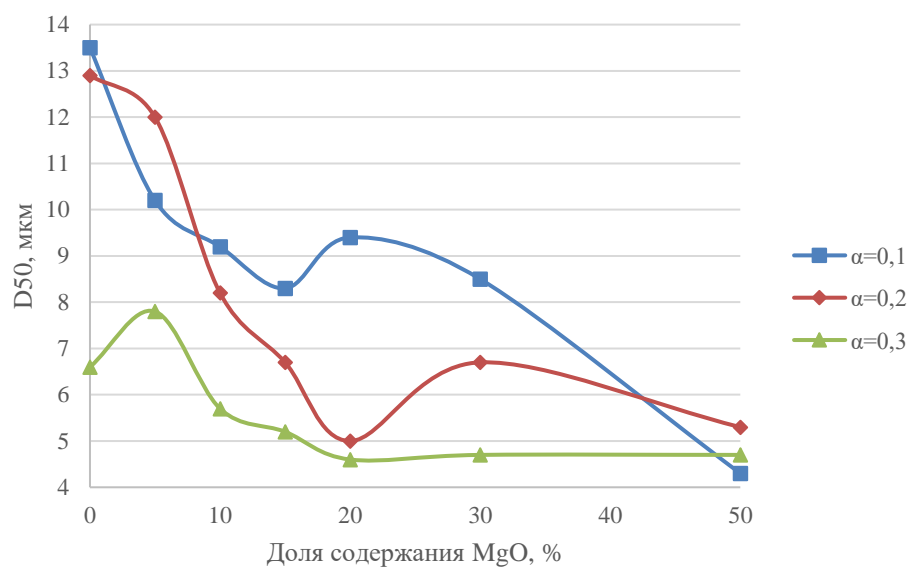


Рисунок 25 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц в полученных водных суспензиях ОК – (4-24) (метод ЛД) при $\alpha=0,1; 0.2; 0.3$.

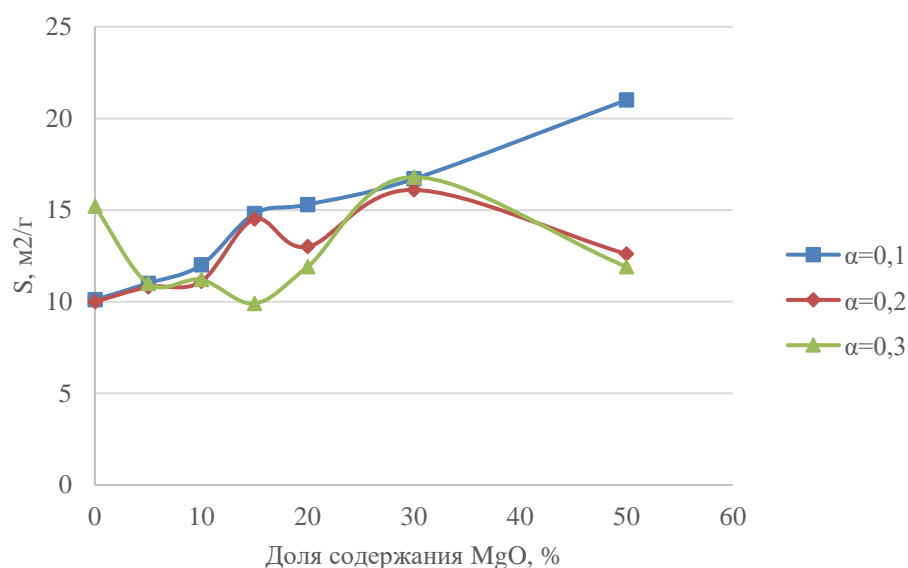


Рисунок 26 – Влияние содержания матрицы (MgO) на удельную поверхность и размер кристаллитов в составе порошков ОК – (4-24) (БЭТ-анализ) при $\alpha=0,1; 0.2; 0.3$.

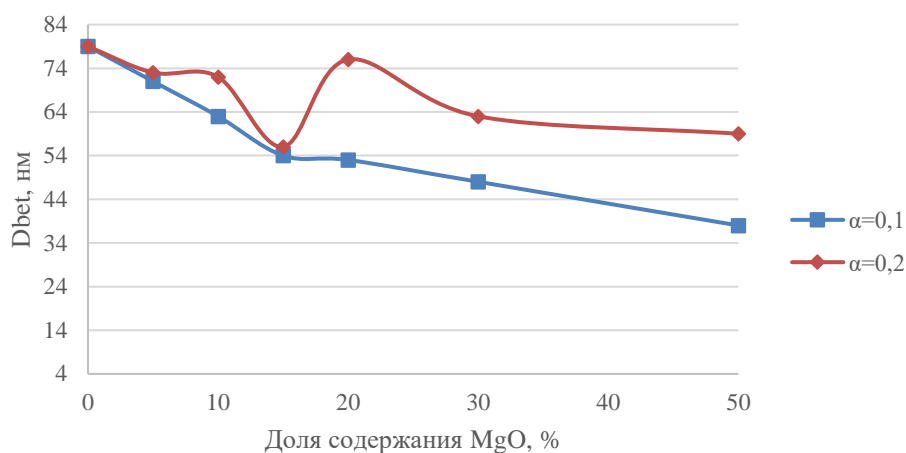


Рисунок 27 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер кристаллитов в составе полученных порошков ОК – (4-17) (БЭТ-анализ) при $\alpha=0,1$; $0,2$.

С помощью полученных результатов, представленных на рисунках 24 – 27 и таблице Е1(приложение Е) можно сказать, что:

- Увеличение исходной концентрации солей металлов (Sm) с 300 г/л до 1500 г/л в растворах ВОНР-1,2,3 приводит к увеличению размера образующихся частиц оксида самария с 9,4 мкм до 11,8 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК–1,2,3 снижается с 12,1 м²/г до 7,6 м²/г, а размер частиц увеличивается с 62 нм до 95 нм (БЭТ).
- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от нуля до 50 % в составе ОК–4,5,6,7,8,9,10 (при $\alpha=0,1$), полученных из растворов ВОНР-4,5,6,7,8,9,10, приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 13,5 мкм до 4,3 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК–4,5,6,7,8,9,10 увеличивается с 10,1 м²/г до 21,0 м²/г, а размер частиц снижается с 79 нм до 38 нм (БЭТ).
- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от нуля до 50 % в составе ОК–11,12,13,14,15,16,17 (при $\alpha=0,2$), полученных из растворов ВОНР-11,12,13,14,15,16,17, также приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 12,9 до 5,3 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК–11,12,13,14,15,16,17 увеличивается с 10,0 м²/г до 12,6 м²/г, а размер частиц снижается с 79 нм до 63 нм (БЭТ-анализ).
- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от нуля до 50 % в составе

ОК (при $\alpha=0,3$), полученных из растворов ВОНР-18,19,20,21,22,23,24, также приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 6,6 до 4,7 мкм (метод ЛД). При этом удельная поверхность ОК–18,19,20,21,22,23,24 также уменьшается с 15,2 м²/г до 11,9 м²/г (БЭТ).

На рисунке 28 показано влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц ОК–25,26,27,28,29,30,31,32,33 в водных суспензиях (метод ЛД)

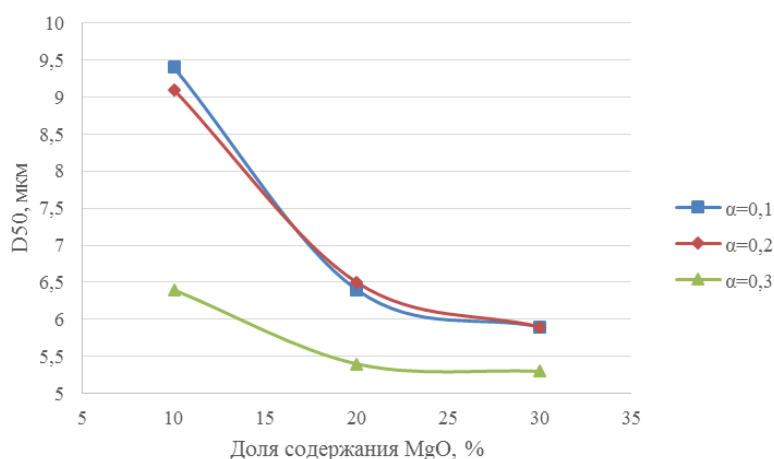


Рисунок 28 – Влияние содержания матрицы (MgO) на размер частиц в полученных водных суспензиях ОК – (25-33) (метод ЛД) при $\alpha=0,1$; 0,2; 0,3.

С помощью полученных результатов, представленных на рисунке 28 и таблице E2(приложение E) можно сказать, что:

- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК (при $\alpha=0,1$), полученных из растворов ВОНР-25,26,27 приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 9,4 мкм до 5,9 мкм (ЛД).
- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК–28,29,30 (при $\alpha=0,2$), полученных из растворов ВОНР-28,29,30, приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 9,1 до 5,9 мкм (ЛД).
- Увеличение массовой доли матрицы (MgO) от 10 % до 30 % в составе ОК–31,32,33 (при $\alpha=0,3$), полученных из растворов ВОНР-31,32,33, приводит к снижению размера образующихся частиц ОК с 6,4 до 5,3 мкм (метод ЛД).

Это позволяет предположить, что плазменная переработка диспергированных растворов данных ВОНР в воздушно-плазменном потоке также приводит к плазмохимическому синтезу наноразмерных ОК.

3.6 Выводы

1. С учетом результатов проведенного обзора литературы и анализа методов отдельного и совместного получения оксидных композиций рекомендован плазмохимический синтез оксидных композиций для дисперсионного уран-плутониевого ядерного топлива из диспергированных водно-органических нитратных растворов металлов, включающих делящиеся металлы, металл матрицы и органический компонент.

2. По результатам проведенных теплотехнических расчетов установлены закономерности влияния органического компонента (ацетон, этанол) на показатели горючести водно-органических нитратных растворов и определены составы растворов ВОНР, обеспечивающие энергоэффективный синтез оксидных композиций « $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-MgO}$ » заданного состава.

3. В результате проведенного термодинамического моделирования процесса плазменной переработки растворов ВОНР в широком диапазоне температур (300÷4000) К установлены закономерности влияния массовой доли воздушного теплоносителя на состав образующихся продуктов, проведена оценка энергозатрат на процесс и определены условия, обеспечивающие в воздушной плазме плазмохимический синтез оксидных композиций « $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-MgO}$ » заданного состава.

4. Проведены экспериментальные исследования процесса синтеза оксидных композиций « $\text{PuO}_2\text{-UO}_2\text{-MgO}$ » в воздушно-плазменном потоке из диспергированных растворов ВОНР, включающих самарий (вместо плутония) и неодим (вместо урана) и исследованы физико-химические и технологические свойства полученных образцов порошков. Установлены закономерности влияния массовой доли матрицы (оксид магния) на размер образующихся кристаллитов в составе оксидных композиций « $\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ ». Показано, что плазменная переработка диспергированных растворов ВОНР в воздушно-плазменном потоке позволяет осуществлять плазмохимический синтез наноразмерных порошков оксидных композиций с высокими физико-химическими и технологическими свойствами.

3.7 Заключение

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза из диспергированных водно-органических нитратных растворов наноразмерных оксидных композиций для дисперсионного уран-плутониевого ядерного топлива.

4 Социальная ответственность

Целью выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) является моделирование процесса синтеза в воздушной плазме наноразмерных оксидных композиций для уран-плутониевого ДЯТ.

В экспериментальной части ВКР было проведено термодинамическое моделирование процесса плазменной переработки водно-органических нитратных растворов (ВОНР), обеспечивающие прямой синтез в воздушной плазме топливных композиций для уран-плутониевого дисперсионного топлива. По его результатам были определены оптимальные условия для практической реализации процесса: массовые доли раствора и плазмообразующего газа, рабочая температура, давление и удельные энергозатраты.

Выполнение ВКР проводилось в отделении ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ) Инженерной школы ядерных технологий (ИЯТШ) Томского политехнического университета. Для выполнения экспериментальной части ВКР в качестве рабочего места использовался компьютерный стол с ЭВМ, соответствующее периферийное оборудование (монитор, клавиатура, мышь) и программное обеспечение (Microsoft Word, Microsoft Excel, TERRA). Потенциальными пользователями результатов исследования являются АО «Сибирский химический комбинат» и ПАО «Машиностроительный завод».

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации [12]. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются

одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником.

4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место при работе с ПК должно составлять не менее чем 6 м² [13]. Выполнение экспериментальной части ВКР проводилось в аудитории 001Б учебного корпуса № 10 ТПУ. Общая площадь аудитории 140,4 м², по 23,4 м² на одного оператора ЭВМ, что соответствует гигиеническим требованиям при работе с ЭВМ. Пространство для ног должно соответствовать следующим параметрам: высота пространства для ног не менее 600 мм, расстояние сиденья до нижнего края рабочей поверхности не менее 150мм, а высота сиденья 420 мм [14].

Так же предусмотрены следующие требования к организации рабочего места пользователя ПЭВМ: конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию [15].

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Объект исследования представляет собой термодинамическую модель протекания процесса плазменной переработки ВОНР, обеспечивающую синтез топливных композиций. При проведении исследований использовалось лицензионное программное обеспечение, научно-техническая литература и справочные издания. Следовательно, можно сделать вывод, что объект исследования не может создать вредных и опасных факторов.

4.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Работа по выполнению экспериментальной части ВКР проводилась при помощи персонального компьютера. При его использовании могут возникнуть различные вредные и опасные факторы. Обеспечение комфортных условий труда в значительной степени оказывает влияние на производительность труда и снижение профессиональных заболеваний. К ним относятся меры, связанные с исключением травматизма, антисанитарии и возгораний [16]. Наиболее вероятные факторы воздействия представлены в таблице 8.

Таблица 8. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+			СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность.
2.Превышение уровня шума	+			
3.Повышенный уровень электромагнитного излучения	+			
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+			
5.Поражение электрическим током	+			
6.Возгорание	+			

При проведении работ, связанных с теоретическим исследованием, важную роль играет планировка рабочего места. Она должна соответствовать правилам охраны труда и удовлетворять требованиям удобства выполнения работы, экономии энергии и времени инженера.

Основным документом, определяющим условия труда при работе с ПЭВМ, является СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к

персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». В правилах указаны основные требования к помещениям, микроклимату, шуму и вибрации, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

Основными опасными факторами являются опасность поражения электрическим током и возгорание. Исходя из анализа состояния помещения, рабочее место инженера, занимающегося теоретическими исследованиями, по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности.

4.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата

Значимым физическим фактором является микроклимат рабочей зоны (температура, влажность и скорость движения воздуха).

Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха влияют на теплообмен и необходимо учитывать их комплексное воздействие. Нарушение теплообмена вызывает тепловую гипертермию, или перегрев.

Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимых сидя и не требующих систематического физического напряжения (категория Ia), приведены в табл. 9, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и [17].

Таблица 9. Нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха

Период года	Категория тяжести работ	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	22÷24	40÷60	0,1
Теплый	Ia	23÷25	40÷60	0,1

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям

допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах представлены в табл. 10.

Таблица 10. Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория тяжести работ	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	20÷25	15÷75	0,1
Теплый	Ia	21÷28	40÷75	0,1÷0,2

4.2.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Естественным источником в помещении служит солнце, искусственными являются электрические лампочки. При длительной работе в условиях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли.

По нормативу [13] освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50° до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (K_3) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

4.2.2.3 Повышенный уровень шума

Акустический шум является одним из раздражителей организма

человека при длительном воздействии. При шумовом воздействии учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, возникают головные боли, ослабляется внимание и замедляются психические реакции, что в конечном итоге приводит к снижению работоспособности человека.

Источниками шума на рабочем месте могут быть различные двигатели и механизмы, используемые в офисной технике. Для категории тяжести работ Ia уровень шума на рабочем месте трудящегося не должен превышать 50 Дб [16].

4.2.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Основное рабочее оборудование – персональный компьютер, является источником электромагнитного излучения. Как и шум, электромагнитное поле своим воздействием может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимания и замедления реакции, что снижает общую работоспособность человека. Электромагнитное поле, создаваемое персональным компьютером, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц, и в том числе мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана при любых положениях ПК не должна превышать 100 мкР/ч [13].

4.2.2.5 Поражение электрическим током

Знание допустимых для человека значений тока и напряжения позволяет правильно оценить опасность поражения и определить требования к защитным мерам от поражения электрическим током.

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека. Под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. Нормы предназначены

для проектирования способов и средств защиты от поражения электрическим током людей при их взаимодействии с электроустановками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука-рука или рука-ноги [17].

Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном (неаварийном) режиме их работы, а также при аварийных режимах производственных и бытовых электроустановок.

Значения напряжения прикосновения и силы тока, протекающего через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки, не должны превышать значений, приведенных в табл. 11.

Таблица 11. Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значение	
	U_{np} , В	I_h , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Для лиц, выполняющих работу в условиях высокой температуры и влажности (относительная влажность больше 75%), эти нормы должны быть уменьшены в три раза.

4.2.2.6 Пожаробезопасность на рабочем месте

Пожар, из-за непосредственной связи с техническими объектами, классифицируют как непреднамеренную чрезвычайную ситуацию техногенного характера [18].

Пожаробезопасность в производственном помещении направлена на сохранение материальных ценностей, жизни и здоровья людей от неконтролируемого процесса горения. Для определения способов осуществления пожаробезопасности необходимо определить категории

помещений определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений и помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов [19]. Аудитория 001Б 10 корпуса относится к классу Д – пониженная пожароопасность, так как в помещении находятся негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

4.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

4.2.3.1 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ

В соответствии с [13] помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь одного рабочего места пользователя ПЭВМ с видеодисплейным терминалом (ВДТ) на базе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна составлять не менее 6 м², а для ВДТ на базе плоского дискретного экрана (жидкокристаллический, плазменный) 4,5 м².

4.2.3.2 Микроклимат

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажности воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли [20].

4.2.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы ВДТ были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Также как средство защиты для минимизации воздействия фактора следует установка местного освещения из-за недостаточной освещенности, оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков.

Если помещение не соответствует вышеописанным нормам, то это влечет за собой ухудшение здоровья рабочих и как следствие ухудшение рабочего процесса.

4.2.3.4 Повышенный уровень шума

В исследовательских аудиториях имеют место шумы различного рода, которые генерируются как внутренними, так и внешними источниками шумов. В рассматриваемом случае внутренними источниками шумов являются рабочее оборудование, а именно персональный компьютер, принтер, вентиляционная система, а также компьютерная техника других инженеров, находящихся в аудитории. При возможном превышении предельно допустимого уровня (ПДУ) достаточно использовать в помещении звукопоглощающие материалы (звукопоглощающая облицовка стен и потолка, оконные шторы) [21]. Для уменьшения шума, проникающего снаружи помещения, следует установить уплотнения по периметру притворов дверей и окон.

4.2.3.5 Электромагнитные излучения (ЭМИ)

При возможном превышении ПДУ возможны следующие меры защиты: увеличение расстояния между источником ЭМИ и рабочей зоной, установка отражающих или поглощающих экранов, конструктивное совершенствование оборудования с целью снижения используемых уровней

ЭМИ, общей потребляемой и излучаемой мощности оборудования.

4.2.3.6 Поражение электрическим током

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от рода и величины напряжения и тока, частоты электрического тока, пути прохождения тока через тело человека, продолжительности воздействия на организм человека, условий внешней среды.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания [22].

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год.

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

4.2.3.7 Пожаробезопасность на рабочем месте

Помещение должно быть оснащено системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре для своевременной эвакуации людей.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Аудитории подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок) [23].

4.3 Экологическая безопасность

4.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду

В данном подразделе рассматривается характер воздействия разработанной термодинамической модели на окружающую среду. Модель не оказывает воздействия на окружающую среду. Однако, при расчетах и моделировании применялись ПЭВМ и периферийное оборудование. Для соблюдения экологической безопасности использование указанных устройств должно соответствовать требованиям нормативных документов.

4.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Отработанные люминесцентные лампы являются очень опасным отходом, в них содержится ртуть в газообразном состоянии. Ртуть относится к вредным веществам первой категории, неправильная утилизация сильно отравляет окружающую среду и находящихся рядом людей [24].

С другой стороны, необходимо также отметить, что после использования компьютерной техники, которая содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы, образуются токсичные отходы,

которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

4.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

При перегорании ртутьсодержащей лампы (выходе из строя) её замену осуществляет лицо, ответственное за сбор и хранение ламп. Отработанные люминесцентные лампы сдаются только на полигон токсичных отходов для захоронения.

- Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:
 - Создание комиссии, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники.
 - Разработка приказа о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.
 - Составление акта утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.
 - Формирование приказа на утилизацию.
 - Утилизация оргтехники, осуществляемая специализированной фирмой.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах [25].

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

Ошибки, допущенные при моделировании процесса плазменной переработки ВОНР, могут привести к следующим авариям при практической реализации процесса:

- возгорание;
- поражение электрическим током;
- воздействие вредных веществ (оксиды азота, углерода, серы).

4.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Основную опасность представляет возгорание. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера.

К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнём. К причинам электрического характера относятся: короткое замыкание; перегрузка проводов; искрение; статическое электричество.

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции. Причины возникновения короткого замыкания: ошибки при проектировании; старение изоляции; увлажнение изоляции; механические перегрузки.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение.

4.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Исходя из [26] пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно-техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефонам 01, 101 или 112 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Выводы

При выполнении раздела «Социальная ответственность» магистерской диссертации были рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя, которые регулируются трудовым кодексом Российской Федерации и СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. Проведен анализ основных вредных и опасных факторов, среди которых: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, повышенный уровень электромагнитного излучения, недостаточная освещенность рабочей зоны, поражение электрическим током и возгорание. Проведен анализ влияния процесса исследования на окружающую среду, а также рассмотрены мероприятия по предотвращению наиболее вероятных ЧС.

5 Финансовый Менеджмент, Ресурсоэффективность и Ресурсосбережение

5.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В данной научно-исследовательской работе рассмотрена возможность плазмохимического синтеза наноразмерных сложных оксидных композиций. Низкотемпературная плазма находит применение в различных областях науки и техники – в частности такая плазма используется для получения дисперсных порошков (в том числе нанопорошков), для переработки различных видов отходов: радиоактивных отходов, отходов производства органических растворителей, отходов водоочистки и т.д. Также при помощи низкотемпературной плазмы осуществляется нанесение на изделия тугоплавких, ударопрочных и других покрытий. Низкотемпературная плазма используется так же для ионизации проб в масс-спектрометрических исследованиях. Все эти процессы являются высокотехнологичными и требуют точного контроля технологических параметров плазменной струи (температура, концентрация ионов и электронов и др.). Поэтому методы диагностики используются на каждом предприятии, которые работают в выше описанных областях.

Можно привести несколько примеров заинтересованных в этой разработке предприятий:

- АО «Сибирский химический комбинат»
- ПАО «Новосибирский завод химконцентратов»
- ПАО «Машиностроительный завод»

5.2 Анализ конкурентных технических решений

Основными конкурентами плазмохимического синтеза являются: метод золь-гель, метод раздельного получения и механического смешения, химическое осаждение, лазерная сублимация. Все вышеперечисленные методы, кроме метода золь – гель, требуют большого количества химических реагентов, что напрямую сказывается на их стоимости. Поэтому, основным конкурентом плазмохимии будем рассматривать метод золь – гель. Рассмотрим основные достоинства и недостатки данных методов.

Плазмохимический синтез. Высокая производительность, отсутствие необходимости в использовании большого количества химических реагентов, частота получаемых нанопорошков. Неоднородность распределения по размерам.

Метод золь-гель. Простота метода, однородность по размерам получаемых порошков. Высокая продолжительность процесса.

Таблица 12. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкуренто-способность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Энергоэкономичность	0,05	4	5	0,2	0,25
2. Надежность	0,1	5	4	0,5	0,4
3. Функциональная мощность	0,1	5	3	0,5	0,3
4. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	4	0,5	0,4
5. Цена	0,12	5	3	0,6	0,36
Итого	0,47	24	19	2,3	1,71

К преимуществам плазмохимического синтеза порошков следует отнести: надежность, функциональную мощность, высокую конкурентную способность (в следствии чистоты получаемых порошков), одностадийность процесса. Однако плазменная обработка имеет ряд недостатков в сравнении с методом золь – гель, а именно: высокое потребление электроэнергии, не изученность процесса.

5.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Проведем SWOT-анализ исследования плазмохимического синтеза нанопорошков, для выявления сильных и слабых сторон данного метода.

Таблица 13.SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Низкая себестоимость плазмоподавляющих добавок. С2. Экономичное использование электроэнергии. С3. Компактность установки С4. Простота монтажа установки и эксплуатация.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Незнученность метода и сложности в его развитии Сл2. Низкая актуальность исследований
Возможности: В1. Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив В2. Усовершенствование установки В3. Сотрудничество с научными исследовательскими центрами	Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив, по усовершенствованию установки и сотрудничеству с научными исследовательскими центрами могут способствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как дешевизна, простота и компактность.	В свою очередь незнученность метода, а также низкая актуальность может внести много трудностей при работе с установкой и разработке новых проектов.
Угрозы: У1. Появление более актуальных методик У2. Малый спрос на установку.	Угрозы слабо влияют на сильные стороны проекта, так как присутствует возможность ее усовершенствования и проведения новых опытов.	Угрозы могут отрицательно сказаться на реализации данной установки в научно-исследовательской деятельности, так как малый спрос и появление более актуальных методик могут сыграть свою роль.

Выводы: К плюсам можно отнести продолжение проведения дальнейших исследований и открытие новых идей по усовершенствованию установки, в том числе и сотрудничеству с научными исследовательскими центрами, которым могут способствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как дешевизна, простота и компактность.

К минусам относятся угрозы, которые могут отрицательно сказаться на реализации данной установки, так как малый спрос и появление более новых методик могут сыграть свою роль.

5.4 Планирование научно-исследовательских работ

5.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 14. Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Изучение литературных источников по теме диссертации	1	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель проекта
	2	Выбор направления исследований	Руководитель проекта
	3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель проекта, исполнитель
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель проекта, исполнитель
	5	Моделирование и проведение экспериментов	Руководитель проекта, исполнитель
	6	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель проекта, исполнитель
	7	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель проекта, исполнитель
Обобщение и представление результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Исполнитель

5.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаях образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожи}$ используется следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min } i} + 2t_{\text{max } i}}{5}, \quad (13)$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\text{min } i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\text{max } i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

$$t_{\text{ож}1} = \frac{3 \cdot 5 + 2 \cdot 8}{5} = 6,2 \text{ дн.}$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{\text{Ч}_i}, \quad (14)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

Ч_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

$$T_{pi} = \frac{6,2}{1} = 6,2 \text{ раб.дн.}$$

5.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками,

характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (15)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; 365

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; 104

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году; 14

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округлены до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} \approx 1.48$$

Таблица 15. Временные показатели проведения научного исследования

Этап	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожг}$, чел-дни			
1	5	8	6,2	Руководитель	6,2	10
2	10	14	11,6	Исполнитель	11,6	18
3	3	5	3,8	Исполнитель	3,8	6
4	5	7	5,8	Исполнитель	5,8	9
5	14	20	16,4	Руководитель, исполнитель	8,2	13
6	5	7	5,8		2,9	5
7	3	5	3,8	Руководитель, исполнитель	1,9	3
8	5	8	6,2		3,1	5
Итого:			59,6		14,3/29,3	69

Календарный план-график проведения научного исследования представлен в приложении В.

5.4.4 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

5.4.5 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{расхi}, \quad (17)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

$Ц_i$ – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Таблица 17. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Баллон со сжатым воздухом	м ³	1	290	290
Баллон с углекислым газом	м ³	1	250	250
Итого			542,51	540

5.4.6 Амортизация оборудования

Рассчитаем амортизацию оборудования:

$$C_{аморт} = \frac{C_{об}}{T}, \quad (18)$$

где $C_{об}$ – стоимость оборудования (руб.);

T – срок службы (дней).

$$C_{аморт} = \frac{2500000}{2920} = 856,2$$

$$C_{аморт} = 856,2 \cdot 2 = 1712,4 \text{ рублей}$$

5.4.7 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (19)$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата;

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (20)$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}, \quad (21)$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб. (в качестве месячного оклада дипломника выступает оклад инженера, который составляет 10 491 руб. и 26 300 руб. для научного руководителя, доцента, кандидата наук);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 15);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 18

Таблица 18 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	52	104
-праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
-отпуск	56	24
-невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	223

Таблица 19. Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T раб раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	1,3	26 300	1 125,60	14,3	20 924,9
Инженер	1,3	12 200	522,14	29,3	19 888,3
Итого $Z_{осн}$					40 813,2

5.4.8 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = k_{доп} \times Z_{осн}, \quad (4.3.4.1)$$

где $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплат (к_{доп}=0,12 – среднее);

$Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 20 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 20 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб	20 924,9	19 888,3
Дополнительная зарплата, руб	2 510,98	2 386,6
Зарплата исполнителя, руб	23 435,88	22 274,9
Итого по статье $C_{зп}$, руб	45 710,78	

5.4.9 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (23)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды;

На 2019г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

$$З_{внеб} = 0,3 \cdot 45\,710,78 = 13\,713,234 \text{ рублей}$$

5.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Накладные расходы в ТПУ составляют от 12 до 14 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = k_{нр} \cdot (З_{осн} + З_{доп} + З_{внеб}) \quad (23)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

$$З_{накл} = 0,12 \cdot (45\,710,78 + 13\,713,234) = 7\,130,88 \text{ руб.}$$

Экспериментальные исследования проводились 9 дней по одному часу, мощность установки 35 кВт/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C_{эл} = \Pi_{эл} \cdot P \cdot F_{об}, \quad (24)$$

где $\Pi_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию;

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Тариф на промышленную электроэнергию для «Национального исследовательского Томского политехнического университета» составляет 5,8 руб. за 1 кВтч.

$$C_{эл} = 5,8 \cdot 9 \cdot 35 = 1827 \text{ руб.}$$

$$\text{Затраты на водоснабжение: } C_{вод} = \Pi_{вод} \cdot Q \cdot F_{об}, \quad (25)$$

где $\Pi_{вод}$ – тариф на промышленное водоснабжение (24,66 руб за 1 м³);

Q – расход воды, м³;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{вод} = 24,66 \cdot 1,8 \cdot 9 = 400 \text{ руб.}$$

Накладные расходы: $7\,130,88 + 400 + 1827 = 9357,88 \text{ руб.}$

5.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта. Бюджет затрат приведен в таблице 21.

Таблица 21. Затраты научно-исследовательской работы

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	540
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	1 712,4
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	45 710,78
4. Отчисления во внебюджетные фонды	13 713,24
5. Накладные расходы	9 357,88
6. Аппарат управления	1 497,26
7. Итого	72 531,56

5.7 Определение ресурсоэффективности исследования

Определение ресурсоэффективности происходит на основе расчета интегрального показателя ресурсоэффективности научного исследования. Данный показатель можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_i^n a_i \cdot b_i, \quad (26)$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности заносим в таблицу 22.

Таблица 22. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1
1. Производительность	0,3	5
2. Энергосбережение	0,2	4
3. Надежность	0,4	5
4. Материалоемкость	0,1	4
ИТОГО	1	

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,4 + 4 \cdot 0,1 = 4,7$$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что научно-техническое исследование будет ресурсоэффективно при первом варианте исполнения проекта, т.е. при высокой производительности и надежности.

Выводы: В ходе выполнения данной работы были определены заинтересованные предприятия в этой разработке, такие как

АО «Сибирский химический комбинат»

ПАО «Новосибирский завод химконцентратов»

ПАО «Машиностроительный завод»

Был произведен анализ конкурентных решений на примере метода золь-гель. По итогам можно сказать, что к преимуществам плазмохимического синтеза порошков следует отнести: надежность, функциональную мощность, высокую конкурентную способность (в следствии чистоты получаемых порошков), одностадийность процесса. Однако плазменная обработка имеет ряд недостатков в сравнении с методом золь – гель, а именно: высокое потребление электроэнергии, не изученность процесса.

С помощью SWOT анализа определены слабые и сильные стороны проекта, разработан перечень этапов работы и определена трудоемкость работы. По итогам можно сказать, что к плюсам можно отнести продолжение проведения дальнейших исследований и открытие новых идей по усовершенствованию установки, в том числе и сотрудничеству с научными исследовательскими центрами, которым могут способствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как дешевизна, простота и компактность.

К минусам относятся угрозы, которые могут отрицательно сказаться на реализации данной установки, так как малый спрос и появление более новых методик могут сыграть свою роль

Был произведен расчет и формирование бюджета научно-технического исследования, который составил 72 531,56 руб

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет делать вывод о том, что разрабатываемый вариант технологии получения нанопорошков является наиболее эффективным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Цыканов В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2000. – 249 с.
2. Скоров Д.М., Бычков Ю.Ф., Дашковский А.М. Реакторное материаловедение. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 344 с.
3. Бескоровайный Н.М. и др. Конструкционные материалы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 324 с.
4. Горский В.В. // Атомная техника за рубежом. – 1999. – Т. 10. – С. 9–13.
5. Самойлов А.Г., Каштанов А.И., Волков В.С. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1965. – 343 с.
6. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Верещак В.Г. Плазмохимические методы получения порошкообразных веществ и их свойства. // Всесоюзный журнал химического общества им. Д.И. Менделеева. 1991 (2). Т.36. С. 166-170.
7. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики. – М.: Техносфера, 2013. – 240 с.
8. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
9. Бескоровайный Н.М. и др. Конструкционные материалы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 324 с.
10. Энциклопедия современной техники. Конструкционные материалы. Т. 2. Гл. ред. А.Г. Туманов. – М.: Советская энциклопедия, 1964.
11. Эйдензон М.А. Магний. – М.: Металлургия, 1969. – 352 с.
12. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики. – М.: Техносфера, 2013. – 240 с.
13. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов. Справочник. Пер. с нем / Под ред. Ивенского Ю.В. –

М.: Металлургия, 1988. – 319 с.

14. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197;

15. СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. «Гигиеническими требованиями к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 15.06.2003 г.;

16. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016;

17. ГОСТ 30333-2007. Паспорт безопасности химической продукции. Общие требования;

18. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – М.: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 4 с.;

19. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.;

20. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11с.;

21. ГОСТ Р 12.1.009-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения;

22. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

23. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях;

24. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.– М.: Минрегион России, 2016;

25. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки;

26. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003;

27. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к

проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT);

28. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

29. ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны;

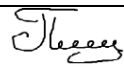
30. Ляпков А.А., Ионова Е.И. Техника защиты окружающей среды. Издание 2-е, переработанное. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 317 с;

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

MODELING AND RESEARCH OF THE PROCESS OF PLASMACHEMICAL SYNTHESIS OF OXIDE COMPOSITIONS FOR DISPERSED PLUTONIUM –URANIUM NUCLEAR FUEL

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM81	Пшеничников А.С.		

Консультант кафедры ТФ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Новоселов Иван Юрьевич			

Консультант – лингвист ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Смирнова У.А.			

INTRODUCTION

In XXI century NPP using ceramic nuclear fuel (NF) based on uranium-235 will still be a significant part of atomic energetics. Such NF has significant disadvantages: low thermal conductivity limiting specific capacity in melting temperature, short usage cycle of uranium NF (reactor shutdown and refueling every 3-5 years), impossibility to create low and ultralow capacity electric power complexes, big costs for spent NF utilization, uranium-235 scarce resources.

In case of using isotopes uranium-238, thorium-232 and plutonium-239 there is no need in expensive isotope enrichment and fuel usage cycle could be raised up to 10-15 years. Possible resource of thorium in Earth crust is 3-5 times as large as uranium ones and using ceramic NF of oxide compositions based on thorium could give an opportunity to create low and ultra-low capacity electric power complexes for using them in remote areas, hard-to-reach regions, mines, and opencasts. However, significant disadvantage of ceramic NF is low thermal conductivity.

Promising line of development of atomic energetics is usage of dispersion nuclear fuel. In such case, inclusion of fissile material (uranium, thorium, plutonium) in form of granulated oxide compositions (microspheres) is placed inside the matrix of material with high thermal conductivity coefficient. Using metallic materials (aluminum, molybdenum, tungsten, stainless steel) as matrix materials increases thermal conductivity coefficient but declines neutron balance because of high neutron resonance absorption. By the way using sol-gel method for obtaining microspheres from mixed water nitric solutions is connected with following disadvantages: multistage process, long process duration, low productivity, need in chemicals, additional hydrogen reduction, high prime cost. For another thing separable obtaining and mechanical mixing microspheres and matrix material do not ensure homogeneous phase distribution in such NF.

Plasmachemical method could be alternative to sol-gel process. Doubtless advantages of plasma application for plasmachemical synthesis of oxide compositions from dispersed mixed water nitric solutions are single stage process,

high speed process, clarity, environment safety, homogeneous phase distribution with desired stoichiometric ratio, possibility to influence on size and particle morphology, equipment compactness. However plasma treatment of water nitric solutions needs significant energy costs (up to 4 MW-h/ton) and it does not allow one-stage producing oxides with required stoichiometric ratio without hydrogen reduction.

For the first time direct plasmachemical synthesis of complex oxide compositions (including oxides of fissile materials and matrix of churlish metal oxide with high thermal conductivity coefficient and low neutron resonance absorption) in air-plasma flow from dispersed combustible water-organic nitric solutions (WONS) was provided. Such WONS includes liquid organic components (alcohols, ketones, etc.) and have low calorific value of minimum 8.4 MJ/kg and adiabatic combustion temperature of minimum 1200 degrees Celsius. Plasma treatment of such WONS provides reducing recycling energy costs (up to 0.1 MW-h/ton), it increases plant productivity. Also it ensures conditions in plasmachemical reactor for direct synthesis of nanosized complex oxide compositions having homogeneous phase distribution and high thermal conductivity coefficient, required stoichiometric ratio without hydrogen reduction.

A1.Methods for large-scale synthesis of nanomaterials

A1.1 Sol-gel

The sol-gel synthesis method is a very common liquid method for the synthesis of various nanomaterials [27]. It is interesting to note that the first documented attempts to deliberately obtain polysilicic acid gels date back to 1640, when Van Helmont, fusing silica with an excess of soda, prepared a water-soluble mass. Under the action of acid on such a solution, a white amorphous precipitate precipitated [28]. In 1648, Johann Glauber received a gel of polysilicic acid by acting on a liquid glass solution of salts of various metals. He then tried in vain to find application for this process, which was due to the low level of industry development. The most widespread practical application of the sol-gel process was

received in the middle of the last century as an effective method for the industrial production of various optical coatings [29]. The basis of the sol-gel method of obtaining materials is the physicochemical processes of gel formation from solutions of the starting components. In fig. Figure 1 is a diagram illustrating the evolution of the structure of the material at various stages of sol-gel synthesis.

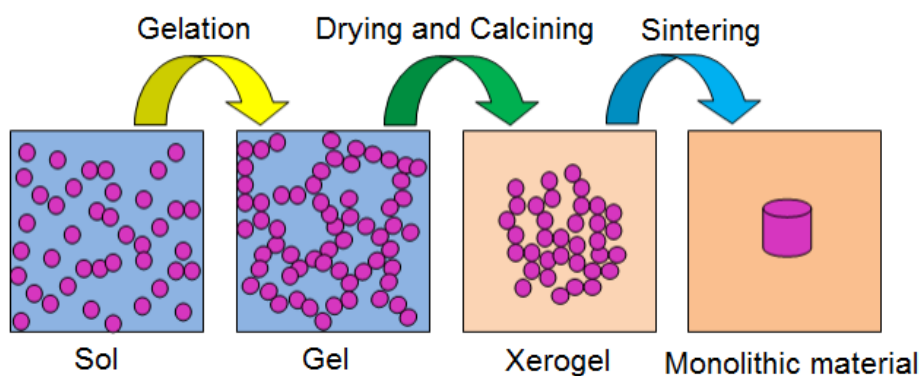


Figure 1. Scheme illustrating the evolution of a material during sol-gel synthesis

As is known , the sol – gel method includes the following most important stages:

1. The creation of a colloidal solution (sol). Liquid colloidal chemical synthesis methods have a fundamentally important limitation associated with the chemical composition of the formed nanoparticles. It is most advisable to use this method for the formation of nanoparticles of chemicals with low solubility in the liquid phase. For aqueous solutions, an example of such substances is silicic acid (silica nanoparticles are formed), hydroxides of various metals, chalcogenides of heavy metals

After the formation of particle nuclei in the solution, they grow by adding additional amounts of the substance directly from the solution or by dissolving smaller particles with a larger excess surface energy. Particle growth processes can be controlled by changes in the chemical composition and pH of the solution, as well as the introduction of special chemical additives.

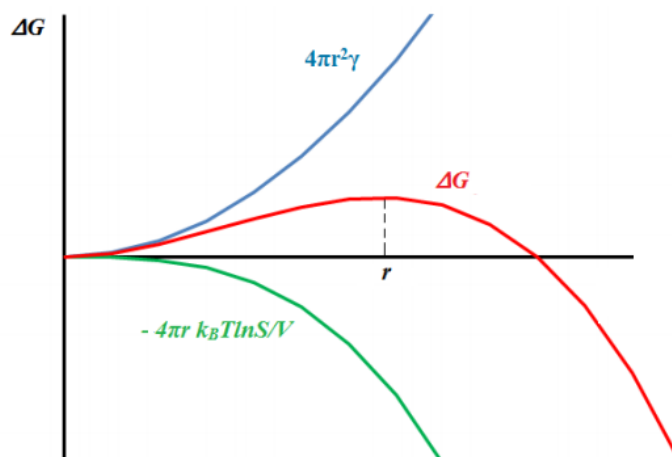


Figure 2. The dependence of the Gibbs free energy on the radius of the nuclei forming in solution

In many cases, to obtain a uniform and stable film-forming solution, it is necessary to introduce several modifying components into its composition. Input components can have different functional purpose. Thus, the introduction of additional solvents reduces the volume concentration of nanoparticles, slowing down the process of their aggregation and increasing the time of gel formation. Surfactants contribute to the stabilization of the colloidal solution, adsorbing on the surface of the forming nanoparticles.

2. The formation of the gel. The gel formation from the colloidal solution is achieved by its destabilization, usually carried out by changing the pH of the colloidal solution. During gel formation, a bulk network of particles forms and the solution loses fluidity. The duration of the transition from sol to gel is determined by the process conditions and can range from a few seconds to many months.

3. Drying the gel. The drying process of the gels is to remove the liquid that fills the space between the particles that make up its network. At this stage, the initially mechanically unstable crude gel undergoes tremendous shrinkage and acquires the properties of a solid. In the synthesis of monolithic materials, drying is the most important stage of the process, huge stresses arise in the drying monolithic gel, cracking and destruction of monolithic samples occurs. As a result of intensive research, theoretical models were created that describe the evolution of the monolithic gel during the drying process, physicochemical mechanisms are

described that describe the evolution of the material, and practical technological methods are developed that ensure the production of defect-free monolithic samples.

Some substances (Drying Control Chemical Additives (DCCA)) help to reduce stresses in the structure of the gel during drying, thereby protecting it from cracking and ensuring the integrity of the products. Often, some organic amines and amides (formamide, dimethylformamide, and others) are used as DCCA. During the heat treatment of the dried material, the complete thermal decomposition of DCCA and the removal of gaseous residues occurs.

4. Heat treatment of the gel and its sintering. To remove residual starting components and strengthen the structure of the material, the dried gels are subjected to heat treatment with a slow increase in temperature. The heat treatment process should exclude sudden temperature changes in order to avoid cracking of the sol-gel material.

A1.2 Plasma-chemical technique

Plasma-chemical technique involves mixing of the basic gas with dispersed aqueous solution of uranium nitrate. Heated to low temperature plasma, nitrogen or argon are used as the basic gas.

Mixing of a high temperature heat carrier gas with dispersed aqueous uranium nitrate solution leads to heating processes and evaporation of the solution droplets followed by thermal decomposition of salt particles, accompanied by enrichment of the gas phase with steam and synthesis of oxide particles [30].

Cooling of the reaction products, so-called tempering, is performed by mixing plasma product with sprayed liquid with high latent vaporization heat. As a liquid could be used deionized water, liquid nitrogen or liquid carbon monoxide which is fed at a pressure of 2 MPa to a region of the reaction zone.

The input rates to reactor conversion zone of gas mixture and dispersed aqueous solution usually differ significantly. Due to the injection area, a reciprocating motion of the gas with contained aerosol particles is formed in the

reactor. Agglomeration of particles and their enlargement occur in the circulation areas.

The growth and agglomeration of particles in the conversion zone promote subsequent separation of dust-gas mixture and reduce the amount of reverse reactions of UO_2 particles with nitric acid vapor.

Values of concentration range and mass flow rate of aqueous uranium nitrate solution are determined by producing conditions for thorium oxide powder composition with the desired concentration of contained metal.

Fig. 3 shows a schematic diagram of the plasmachemical process facility.

Basic gas (nitrogen, argon or a mixture there of) is heated to a low temperature plasma state ($5000 \div 6000\text{K}$) with a high frequency induction discharge in a plasmatron HFI-2 and fed into the reaction zone 4 of the plasma reactor [30].

An aqueous uranium nitrate solution from the tank 10 is pumped into the plasma reactor.

Injection of a solution into the mixing chamber of the reactor is carried out by pneumatic nozzles, providing an average dispersion of the spray liquid is not more than $(50 \div 70) \cdot 10^{-6} \text{ m}$, in addition the injectors are supplied with pressurized gas (nitrogen).

After mixing heat-gas carrier temperature is reduced to $2000 \div 3000\text{K}$.

Solution injection to the reforming zone is conducted at an angle to the heat carrier gas motion direction. During the process, pressure in the plasma reactor conversion zone is maintained at $10 \div 50 \text{ kPa}$ below atmospheric pressure.

As a result, of thermal decomposition of the dispersed aqueous salt solution is formed in the conversion zone uranium oxide aerosol with a particular molar ratio O/U depending on the reduction potential of the gas phase.

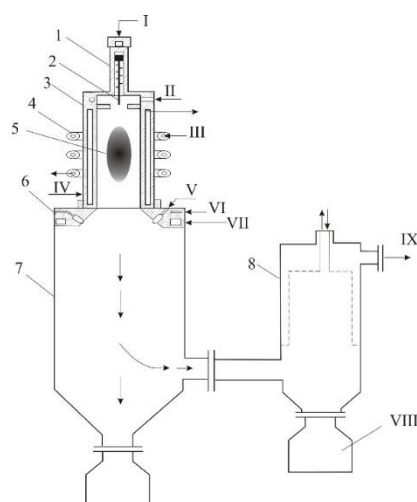


Figure 3. 1-igniter; 2- electrode; 3- plasma torch; 4- inductor; 5- plasma discharge; 6- spraying device; 7- plasma chemical reactor; 8- filter; I- gas to ignite the discharge; II-gas for plasma formation; III- water to cool the inductor; IV- water to cool the plasma torch; V- processed inorganic metal compounds; VI- air for spraying; VII-Cooling water for nozzle; VIII- resulting product; IX- gas cleaning.

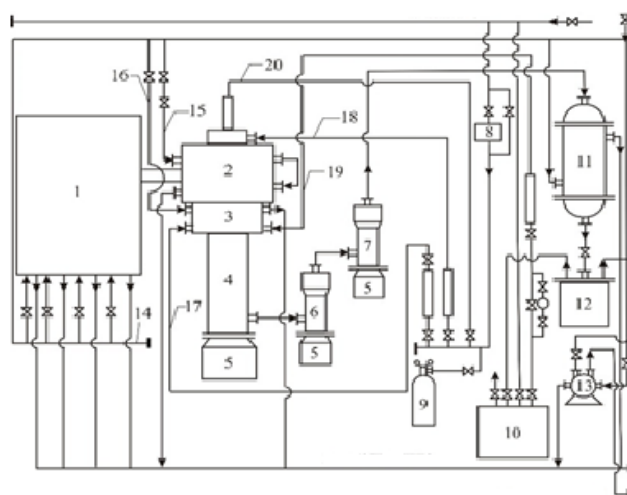


Figure 4. 1- HF generator, 2- the plasma torch, 3- nozzle; 4- plasmachemical reactor, 5- reception bunker, 6- the first vortex dust collector, 7- second vortex dust collector, 8- filter, 9- plasma gas bottle; 10- feed solution container, 11- condensate container, 12- condensate tank, 13- vacuum pump, 14- cooling water for generator, 15- cooling water for plasma torch, 16- cooling water for nozzle, 17- gas for solution spraying, 18- gas for plasma formation, 19- the solution, 20- gas for ignition [5].

The size of the aerosol particles is about $(2\div5)\cdot 10^{-6}$ m. Separation of oxide

particles from dust and gas flow is carried in separation system, which consist of a cyclone filter and ceramic filter, worked at a temperatures of $500\div 600^{\circ}\text{C}$ and $200\div 300^{\circ}\text{C}$ respectively. Powder is collected in the reception bunker (5).

The purified gas consisting of residual vapor water, nitric acid vapors, nitrogen and hydrogen is sent to the joint condensation of water vapor and nitric acid to the refrigerator condensate container (11). Nitrogen (argon) is thrown in to the gas cleaning unit.

Uranium oxide aerosol also concentrates in distillation residue and could be recycled in the plasma reactor as a solution by adding thorium salts. Then oxide powder is heat-treated in a reducing atmosphere to remove residual nitrogen and adjusting the molar ratio O/U to $2.06\div 2.18$.

This technology provides the outlet of the plasma unit homogenous mixture of thorium oxide in a single step with utilization of circulating solution.

A2. The laboratory plasmatron facility description

Laboratory plasma stand based on a high-frequency plasma torch and designed to investigate the processes of the plasma combustion of various flammable compositions under a high-frequency discharge in air plasma.

The plasma facility includes a high frequency generator HFG 8-60 / 13-01 (oscillating power up to 60 kW, operating frequency of 13.56 MHz) [30], which through a coaxial pin 6 RF energy is supplied to the water-cooled copper electrode 4 of a high-frequency plasma torch-3, intended to generate air jets with a weight average plasma temperature to 4000 K. The discharge chamber of a high-frequency plasma torch plasmatron is made of quartz 860 mm length tube with 50 mm diameter.

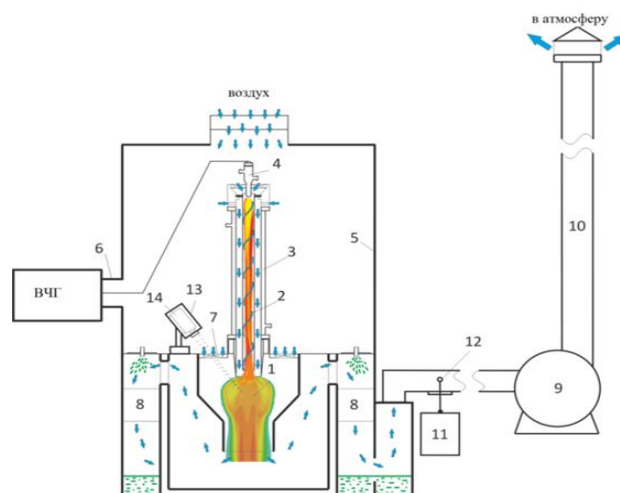


Figure 5. Scheme of the Plasma facility based on the high-frequency plasma torch: 1 - disperser 2 - HFT discharge, 3 - high-frequency plasma torch; 4 - copper electrode, 5 - case; 6 - coaxial output; 7 - reactor impeller; 8 - "wet" flue gas cleaning unit; 9 - exhaust fan (BP 12-26, №4), 10 - duct, 11 - gas analyzer «Quintox» KM 9106, 12 - sampler; 13 - a protective casing of the pyrometer, 14 - pyrometer IPE 140/45, ICH - VCHG8-60 / 13-01 high-frequency generator.

High-pressure exhaust fan 9 provides pumping of a plasma gas (air) through the plasma torch of a high-frequency torch plasmatron-3, as well as air pumping through the reactor.

The input unit plasma gas, installed at the entrance of the HFT plasmatron is equipped with an impeller which swirl the incoming plasma gas (air) into the discharge chamber of a high-frequency torch plasmatron.

The impeller of the reactor impeller (7) installed at the inlet of it is designed to swirl the incoming air and allow to adjust a chute inlet area of the impeller.

The Gas analyzer (11) with the sampling device (12) for determining the content of the reactor gases pollutants (CO, NO, NO₂, SO₂, C_xH_y) in the flow.

The gas analyzer 11 with the sampling device (12) is used for determination of the content in exhaust reactor gas fumes (CO, NO, NO₂, SO₂, C_xH_y) and measurements with a Pitot tube of the reactor air flow rate in the gas duct 250 mm diameter as well as measurements of the plasma gas (air) velocity through the HFT-plasmatron.

CONCLUSION

A literature review on the uranium nuclear fuel technology processes was made. Sol-gel, and plasma-chemical technologies of production of uranium-thorium compositions were described. Each method is effective, but the most perspective one is plasma-chemical.

In our research work, we use a special modelling soft Terra and plasma-chemical facility to study the plasma processes. Configuration and construction of our facility were described. Also, the scheme of the facility is shown.

References

1. W. Luther, in Industrial application of nanomaterials-chances and risks, W. Luther (Ed.), Future Technologies Division, Dusseldorf, 2004.
2. K.V. Prashant, D. Meisel, Stud. Surf. Sci. Catal. 103 (1997) 237.
3. J.H. Fendler, Korean J. Chem. Eng. 18 (2001) 1.
4. D. Vollath, Nanomaterials: an introduction to synthesis, properties and applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
5. M.L. Hitchman, K.F. Jensen, Chemical vapour deposition: principles and applications, Academic Press, New York, 1993.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

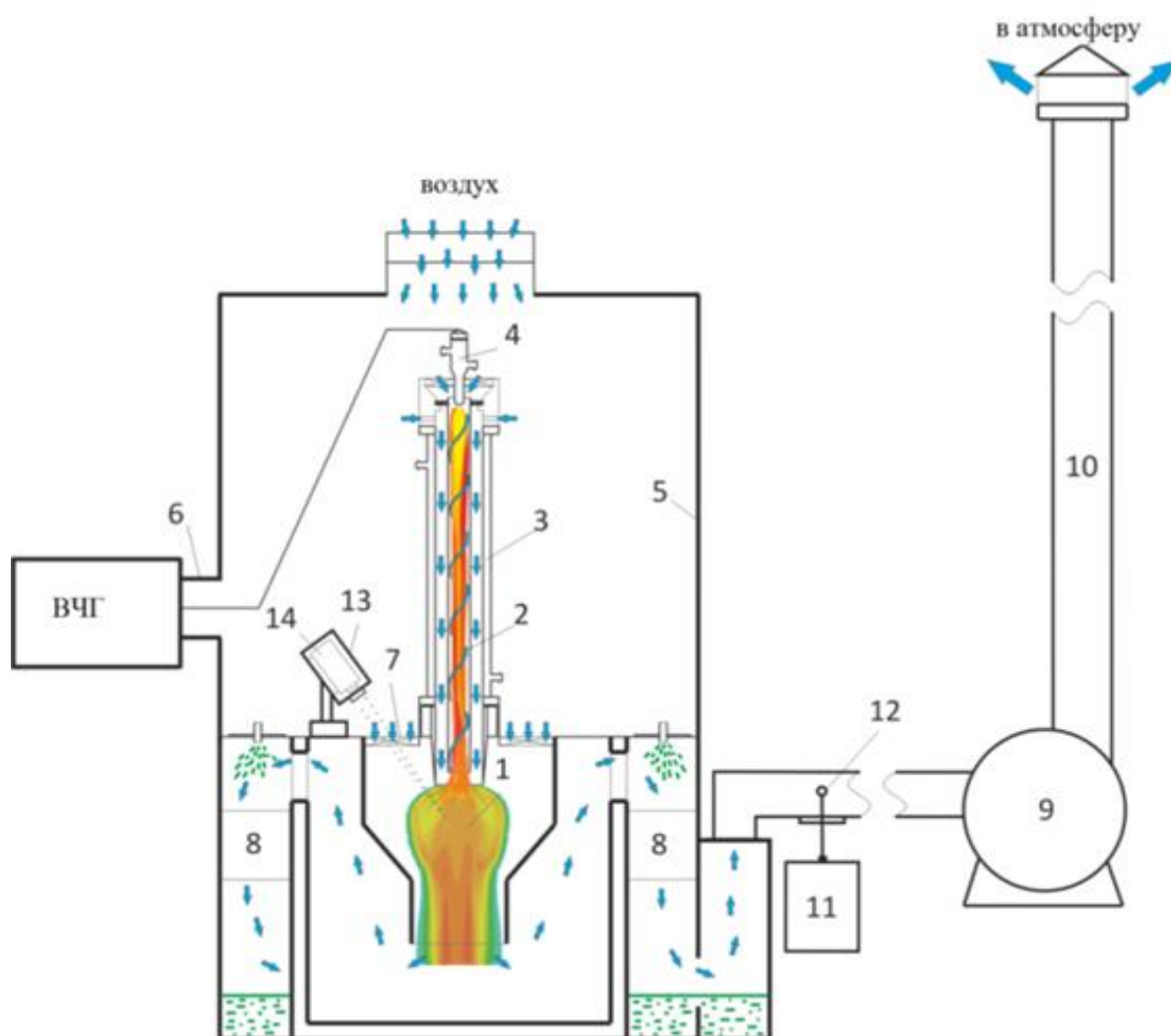


Рисунок Б1 – Схема плазменного стенда на базе ВЧФ-плазмотрона:

1 – диспергатор, 2 – ВЧФ-разряд, 3 – ВЧФ-плазмотрон; 4 – медный электрод, 5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – импеллер реактора; 8 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор (ВР 12-26, №4), 10 – воздуховод, 11 – газоанализатор «Quintox» КМ 9106, 12 – пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра, 14 – пирометр IPE 140/45, ВЧГ – высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13-01.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В1 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ рабо т	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ											
				Март			Апрель			Май			Июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	10												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель	18												
3	Выбор направления исследований	Руководитель	6												
4	Проведение патентных исследований	Руководитель	9												
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, инженер	13												
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Руководитель, инженер	5												
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, инженер	3												
8	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, инженер	5												



– Руководитель



– Студент

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1. Измерение расхода воздуха через газоход с узлом ввода ПГ

№	Симп		Р _{ПГ} , ρv ² /2							Р _{ср}
	3хп	См ²	1	2	3	4	5	6	7	мБар
1	3х10	1650	2,52	2,67	2,55	2,68	2,63	2,57	2,6	2,60
2	3х8	1320	2,55	2,52	2,5	2,49	2,5	2,48	2,47	2,50
3	3х6	990	2,4	2,35	2,41	2,39	2,41	2,42	2,38	2,39
4	3х4	660	2,14	2,08	2,2	2,19	2,13	2,18	2,17	2,16
1	3х10	1650	2,59	2,57	2,7	2,66	2,61	2,6	2,67	2,63
2	3х8	1320	2,36	2,45	2,4	2,44	2,41	2,39	2,45	2,41
3	3х6	990	2,28	2,36	2,41	2,35	2,34	2,28	3,32	2,48
4	3х4	660	2,2	2,16	2,15	2,18	2,29	2,06	2,15	2,17

Таблица Г2. Измерение расхода воздуха через газоход с узлом ввода ПГ

№	Симп		Р _{ПГ} , ρv ² /2							Р _{ср}
	3хп	См ²	1	2	3	4	5	6	7	мБар
1	3х10	1650	3,94	4,02	4	4,01	3,98	3,99	4,02	3,99
2	3х8	1320	3,05	3,15	3,1	3,07	3,05	3,11	3,08	3,09
3	3х6	990	2,9	2,92	2,8	2,85	2,87	2,9	2,85	2,87
4	3х4	660	2,7	2,68	2,69	2,67	2,7	2,68	2,69	2,69
1	3х10	1650	3,92	4,06	4,02	3,98	3,95	3,99	4,05	4,00
2	3х8	1320	3	3,06	3,12	3,08	3,05	3,1	3,06	3,07
3	3х6	990	2,85	2,9	2,87	2,86	2,9	2,81	2,9	2,87
4	3х4	660	2,68	2,77	2,73	2,7	2,69	2,73	2,72	2,72

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица Д1. Полученные значения при проведении исследования и оптимизации режимов работы плазменного реактора на базе ВЧФ – плазматрона.

						Анод				Сетка				Электрод				Корпус			
№	I, А	U _а , кВТ	P ₀ , кВТ	T _{дг} ,	S, см ²	m _а , кг/с	dT _а ,	P _а , кВТ	T _а ,	m _с , кг/с	dT _с ,	P _с , кВТ	T _с ,	m _э , кг/с	dT _э ,	P _э , кВТ	T _э ,	m _{кп} , кг/с	dT _{кп} ,	P _{кп} , кВТ	T _{кп} ,
1	3	5,7	17,1	34	3x10	0,244	7,5	7,65	18,4	0,066	4,3	1,18	12,3	0,119	4,1	2,05	14,7	0,057	1	0,238	11,9
2	3	5,7	17,1	34,6	3x8	0,244	7,5	7,65	18,4	0,066	4,3	1,18	12,3	0,119	4,1	2,05	14,7	0,057	1	0,238	11,9
3	3	5,8	17,4	35,7	3x6	0,244	7,6	7,75	18,5	0,066	4,3	1,18	12,3	0,119	4,2	2,1	14,8	0,057	1	0,238	11,9
4	3	5,8	17,4	36,6	3x4	0,244	7,6	7,75	18,5	0,066	4,3	1,18	12,3	0,119	4,2	2,09	14,8	0,057	1	2,38	11,9
1	3,5	5,8	20,3	37,3	3x10	0,244	8,5	8,67	19,4	0,066	3,7	1,02	11,7	0,119	4,9	2,45	15,5	0,057	1	0,238	11,9
2	3,5	5,8	20,3	36,8	3x8	0,244	8,5	8,67	19,4	0,066	3,8	1,05	11,8	0,119	4,9	2,45	15,5	0,057	1	0,238	11,9
3	3,5	6,3	22,05	36,5	3x6	0,244	8,4	8,57	19,3	0,066	4	1,1	12	0,119	4,9	2,45	15,5	0,057	1	0,238	11,9
4	3,5	6,5	22,75	37	3x4	0,244	8,6	8,77	19,5	0,066	4,1	1,13	12,1	0,119	5,1	2,55	15,7	0,057	1	0,238	11,9
1	4	6,5	26	37,8	3x10	0,244	9,3	9,49	20,2	0,066	3,6	0,99	11,6	0,119	5,4	2,7	16	0,057	1	0,238	11,9
2	4	6,7	26,8	38	3x8	0,244	9,4	9,59	20,3	0,066	3,5	0,96	11,5	0,119	5,5	2,75	16,1	0,057	1	0,238	11,9
3	4	6,9	27,6	37,9	3x6	0,244	9,6	9,79	20,5	0,066	3,3	0,91	11,3	0,119	5,6	2,8	16,2	0,057	0,9	0,214	11,8
4	4	7	28	36,8	3x4	0,244	9,6	9,79	20,5	0,066	3	0,83	11	0,119	5,7	2,85	16,3	0,057	0,8	0,191	11,7

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е1 – Состав и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические и технологические свойства полученных простых и сложных оксидных композиций, моделирующих в воздушно-плазменном потоке плазмохимический синтез плутоний-уранового дисперсионного ядерного топлива

Состав ОК	Состав ВОНР					Режимы переработки ВОНР		Лазерная дифракция ОК	БЭТ-анализ ОК		Параметры прессования ОК	
	№	Nd(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O, г/л	Sm(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O, г/л	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O, г/л	C ₃ H ₆ O, % масс.	f _ф , Гц	Q _{отв} , кг/с	D ₅₀ , мкм	S, м ² /Г	D _{bet} , нм	ρ _{нас} , г/см ³	ρ _{нас} , %
ОК-1 (100% Sm ₂ O ₃)	ВОНР-1	-	300,0	-	64,9	35	2,8	9,4	12,1	62	0,432	5,4
ОК-2 (100% Sm ₂ O ₃)	ВОНР-2	-	500,0	-	61,6	35	2,8	11,1	7,6	95	0,481	5,8
ОК-3 (100% Sm ₂ O ₃)	ВОНР-3	-	1000,0	-	54,6	35	2,8	11,8	-	-	0,513	6,1
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3 / (\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Sm}_2\text{O}_3) = 0,1$												
ОК-4 (90% Nd ₂ O ₃ –10% Sm ₂ O ₃)	ВОНР-4	293,4	31,9	-	64,4	35	2,8	13,5	10,1	79	0,473	6,3
ОК-5 (85,5% Nd ₂ O ₃ –9,5% Sm ₂ O ₃ –5,0% MgO)	ВОНР-5	278,7	30,3	80,1	63,3	35	2,8	10,2	-	-	0,442	5,9
ОК-6 (81,0% Nd ₂ O ₃ –9,0% Sm ₂ O ₃ –10,0% MgO)	ВОНР-6	264,0	28,7	160,3	62,3	35	2,8	9,2	-	-	0,410	5,5
ОК-7 (76,5% Nd ₂ O ₃ –8,5% Sm ₂ O ₃ –15,0% MgO)	ВОНР-7	249,4	27,1	240,4	61,3	35	2,8	8,3	14,8	54	0,429	5,7
ОК-8 (72,0% Nd ₂ O ₃ –8,0% Sm ₂ O ₃ –20,0% MgO)	ВОНР-8	234,7	25,5	320,5	60,3	35	2,8	9,4	15,3	53	0,473	6,4
ОК-9 (63,0% Nd ₂ O ₃ –7,0% Sm ₂ O ₃ –30,0% MgO)	ВОНР-9	205,4	22,3	480,8	58,4	35	2,8	8,5	16,7	48	0,458	6,1
ОК-10 (45,0% Nd ₂ O ₃ –5,0% Sm ₂ O ₃ –50,0% MgO)	ВОНР-10	146,7	15,9	801,3	55,0	35	2,8	4,3	21,0	38	0,456	6,1
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3 / (\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Sm}_2\text{O}_3) = 0,2$												
ОК-11 (80,0% Nd ₂ O ₃ –20,0% Sm ₂ O ₃)	ВОНР-11	260,8	63,8	-	64,4	35	2,8	12,9	10,0	79	0,432	5,7
ОК-12 (76,0% Nd ₂ O ₃ –19,0% Sm ₂ O ₃ –5,0% MgO)	ВОНР-12	247,7	60,6	80,1	63,4	35	2,8	12,0	10,8	73	0,384	5,1
ОК-13 (72,0% Nd ₂ O ₃ –18,0% Sm ₂ O ₃ –10,0% MgO)	ВОНР-13	234,7	57,4	160,3	62,3	35	2,8	8,2	11,1	72	0,382	5,1
ОК-14 (68,0% Nd ₂ O ₃ –17,0% Sm ₂ O ₃ –15,0% MgO)	ВОНР-14	221,6	54,2	240,4	61,2	35	2,8	6,7	14,5	56	0,417	5,7
ОК-15 (64,0% Nd ₂ O ₃ –16,0% Sm ₂ O ₃ –20,0% MgO)	ВОНР-15	208,6	51,0	320,5	60,3	35	2,8	5,0	13,0	76	0,463	7,6
ОК-16 (56,0% Nd ₂ O ₃ –14,0% Sm ₂ O ₃ –30,0% MgO)	ВОНР-16	182,5	44,6	480,8	58,4	35	2,8	6,7	16,1	63	0,480	8,2
ОК-17 (40,0% Nd ₂ O ₃ –10,0% Sm ₂ O ₃ –50,0% MgO)	ВОНР-17	130,4	31,9	801,3	55,0	35	2,8	5,3	12,6	59	0,431	5,7

Продолжение таблицы Е1 – Состав и режимы переработки растворов ВОНР

$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3/(\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Sm}_2\text{O}_3) = 0,3$												
ОК-18 (70,0% Nd_2O_3 –30,0% Sm_2O_3)	ВОНР-18	228,2	95,7	-	64, 5	35	2,8	6,6	15,2	-	-	-
ОК-19 (66,5% Nd_2O_3 –28,5% Sm_2O_3 –5,0% MgO)	ВОНР-19	216,8	90,9	80,1	63,4	35	2,8	7,8	11,0	-	-	-
ОК-20 (63,0% Nd_2O_3 –27,0% Sm_2O_3 –10,0% MgO)	ВОНР-20	205,4	86,1	160,3	62,3	35	2,8	5,7	11,2	-	-	-
ОК-21 (59,5% Nd_2O_3 –25,5% Sm_2O_3 –15,0% MgO)	ВОНР-21	193,9	81,3	240,4	61,3	35	2,8	5,2	9,9	-	-	-
ОК-22 (56,0% Nd_2O_3 –24,0% Sm_2O_3 –20,0% MgO)	ВОНР-22	182,5	76,5	320,5	60,3	35	2,8	4,6	11,9	-	-	-
ОК-23 (49,0% Nd_2O_3 –21,0% Sm_2O_3 –30,0% MgO)	ВОНР-23	159,7	67,0	480,8	58,4	35	2,8	4,7	16,8	-	-	-
ОК-24 (35,0% Nd_2O_3 –15,0% Sm_2O_3 –50,0% MgO)	ВОНР-24	114,1	47,8	801,3	55,0	35	2,8	4,7	11,9	-	-	-

Таблица Е2 – Состав и режимы переработки растворов ВОНР, физико-химические свойства полученных простых и сложных оксидных композиций, моделирующих в воздушно-плазменном потоке плазмохимического синтез плутоний- уранового дисперсионного топлива

Состав ОК	Состав ВОНР					Режимы переработки ВОНР		Лазерная дифракция ОК	БЭТ-анализ ОК		Параметры прессования ОК	
	№	$\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г/л	$\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г/л	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г/л	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$, % масс.	fф, Гц	$Q_{\text{отв}}$, кг/с	D_{50} , мкм	S, м ² /г	$D_{\text{бет}}$, нм	$\rho_{\text{нас}}$, г/см ³	$\rho_{\text{нас}}$, %
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3/(\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Sm}_2\text{O}_3) = 0,1$												
ОК-25 (81,0% Nd_2O_3 –9,0% Sm_2O_3 –10,0% MgO)	ВОНР-25	264,0	28,7	160,3	62,3	50	2,8	9,4	-	-	-	-
ОК-26 (72,0% Nd_2O_3 –8,0% Sm_2O_3 –20,0% MgO)	ВОНР-26	234,7	25,5	320,5	60,3	50	2,8	6,4	-	-	-	-
ОК-27 (63,0% Nd_2O_3 –7,0% Sm_2O_3 –30,0% MgO)	ВОНР-27	205,4	22,3	480,8	58,4	50	2,8	5,9	-	-	-	-
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3/(\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Sm}_2\text{O}_3) = 0,2$												
ОК-28 (72,0% Nd_2O_3 –18,0% Sm_2O_3 –10,0% MgO)	ВОНР-28	234,7	57,4	160,3	62,3	50	2,8	9,1	-	-	-	-
ОК-29 (64,0% Nd_2O_3 –16,0% Sm_2O_3 –20,0% MgO)	ВОНР-29	208,6	51,0	320,5	60,3	50	2,8	6,5	-	-	-	-
ОК-30 (56,0% Nd_2O_3 –14,0% Sm_2O_3 –30,0% MgO)	ВОНР-30	182,5	44,6	480,8	58,4	50	2,8	5,9	-	-	-	-
$\alpha = \text{Nd}_2\text{O}_3/(\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Sm}_2\text{O}_3) = 0,3$												
ОК-31 (63,0% Nd_2O_3 –27,0% Sm_2O_3 –10,0% MgO)	ВОНР-31	205,4	86,1	160,3	62,3	50	2,8	6,4	-	-	-	-
ОК-32 (56,0% Nd_2O_3 –24,0% Sm_2O_3 –20,0% MgO)	ВОНР-32	182,5	76,5	320,5	61,4	50	2,8	5,4	-	-	-	-
ОК-33 (49,0% Nd_2O_3 –21,0% Sm_2O_3 –30,0% MgO)	ВОНР-33	159,7	67,0	480,8	58,4	50	2,8	5,3	-	-	-	-